

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2017

Bc. Petr Běčák

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Vyhodnocování zářivého toku svítidel v infračervené oblasti a jeho využití při spolupráci s kamerovými systémy**

**Evaluation of radiated flux flow from luminaires in the infrared part of spectrum and its use in cooperation with CCTV**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Petr Běčák**

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Vyhodnocování zářivého toku svítidel v infračervené oblasti a jeho  
využití při spolupráci s kamerovými systémy  
Evaluation of radiated flux flow from luminaires in the infrared part of  
spectrum and its use in cooperation with CCTV

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

- o Rozdíl zářivých a světelně-technických veličin
- o Parametry LED vyzařující v IR oblasti
- o Spektrální citlivost kamerových systémů
- o Měření zářivých parametrů infrazářičů
- o Návrh infrazářičů pro optimální snímání IR kamerou

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha 2011
- [2] Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU
- [4] Manuály k výpočetním programům (Relux, Dialux, WILS)

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Novák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne ..28.4.2017..

.....  
Bc. Petr Běčák

## Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Tomášovi Novákovi, Ph.D. za pravidelné konzultace řešené problematiky a ochotný přístup. Dále patří poděkování doktorandskému sboru, jmenovitě Ing. Petrovi Bosovi a Ing. Richardovi Balejovi za pomoc při konzultaci praktické části v mé diplomové práci.

## **Abstrakt**

Cílem mé práce bylo provést měření zářivých parametrů infrazářičů realizovaných pomocí IR LED. Na základě naměřených charakteristik byl proveden návrh a porovnání několika čipů, standardně používaných v dnešních kamerových systémech, spolupracujících s IR přísvitem. Na základě výsledných přenosů čipů kamer bylo rozhodnuto, zda-li je senzor kamerového systému vhodný pro snímání v IR oblasti spektra či nikoli. Toto přizpůsobení čipů je nutno vyhledat a posoudit z toho důvodu, aby byl energeticky maximálně optimalizován diagnostický řetězec - spolupracujících IR LED a CCTV, či diagnostických kamer hojně využívaných v průmyslových aplikacích.

Kamerové systémy pracují se zářivými parametry a jejich čipy musí být dostatečně citlivé, aby byly schopny optimálně zhodnotit vyzařované spektrum IR LED. Proto se v této práci zabývám právě měřením zářivých parametrů infrazářičů, respektive měřením zářivého toku a spektrálního vyzařování IR LED.

## **Klíčová slova**

infračervené záření, infrazářič, IR LED, zářivé veličiny, spektrometr, spektrální citlivost lidského oka, spektrální citlivost kamerových systémů, CCD čip, CMOS čip, křivky zářivosti

## **Abstract**

This diploma thesis deals with measurements of radiant parameters of infrared heaters, which are realized by IR LEDs. Based on the measured characteristics, several chips, standardly used in today's IR camera systems, have been designed and compared. It was decided based on resulting transmissions of camera chips, if the camera system chip is suitable for infrared part of spectrum or not. This adaptation of the camera chips is needed to be investigated and evaluated to maximize the optimization of the diagnostic chain - cooperating IR LEDs with CCTV, or diagnostic cameras often used in industrial applications.

Camera systems work with radiant parameters and their chips must be sensitive enough to be able to optimally evaluate the irradiated spectrum of IR LEDs. That is why I deal with the measuring of infrared radiant parameters, more precisely with measuring the radiant flux and spectral emission of IR LEDs in this thesis.

## **Key Words**

Infrared radiation, infrared heater, IR LED, radiant quantities, spectrometer, spectral sensitivity of a human eye, spectral sensitivity of a CCTV, CCD chip, CMOS chip, radiance curves

## Seznam některých použitých symbolů a zkratek

### Seznam použitých zkratek

A/D	Analogově/Digitální (převodník)
AČT	Absolutně černé těleso
BSI CMOS	CMOS snímač se zpětným osvětlením (z anglického: BackSide-Illumination)
CCD	Elektronická součástka pro snímání obrazové informace (z anglického: Charge-Coupled Device)
CCTV	Kamerový systém (z anglického: Closed Circuit Television)
CMOS	Technologie kov-oxid-polovodič (z anglického: Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)
IR	Infračervené (z anglického: Infrared)
IrDA	Komunikační infračervený port (z anglického: Infrared Data Association)
LAN	Lokální (místní) síť (z anglického: Local Area Network)
LED	Dioda emitující světlo (z anglického: Light-Emitting Diode)
LL	Lineární světlo (z anglického: Linear Light)
MX	Matrixové světlo (z anglického: Matrix Light)
RL	Prstencové světlo (z anglického: Ring Light)
SP	Bodové světlo (z anglického: Spot Light)
UV	Ultrafialové (z anglického: Ultraviolet)
Wi-Fi	Způsob komunikace mezi bezdrátovými zařízeními

### Seznam použitých symbolů

$b$	(mK)	Konstanta Wienova zákona posuvu
$c$	(m s <sup>-1</sup> )	Rychlost světla ve vakuu
$E$	(V m <sup>-1</sup> )	Intenzita elektrického pole
$H$	(A m <sup>-1</sup> )	Intenzita magnetického pole
$h$	(Js)	Planckova konstanta
$I_n$	(A)	Jmenovitý elektrický proud
$M_e$	(W m <sup>-2</sup> )	Intenzita vyzařování
$P$	(W)	Elektrický příkon
$T$	(K)	Termodynamická teplota
$U_n$	(V)	Jmenovité napájecí napětí
$\alpha$	(-)	Činitel pohltivosti
$\eta$	(%)	Měrný zářivý výkon
$\lambda$	(m)	Vlnová délka
$\rho$	(-)	Činitel odraznosti
$\sigma$	(W m <sup>-2</sup> m <sup>-4</sup> )	Stefanov-Boltzmannova konstanta
$\Phi_{sv}$	(W)	Zářivý tok

# Obsah

<b>1 Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Infračervené záření .....</b>	<b>2</b>
2.1 Charakteristika infračerveného záření .....	2
2.2 Historie infračerveného záření .....	3
2.3 Záření černého tělesa a jeho zákony .....	5
2.3.1 Kirchhoffův zákon .....	5
2.3.2 Absolutně černé těleso .....	6
2.3.3 Stefanův-Boltzmannův zákon .....	7
2.3.4 Wiennův zákon posuvu .....	7
2.3.5 Plancův zákon.....	8
2.4 Optické vlastnosti látek v infračerveném oboru .....	8
2.4.1 Nejužívanější optické materiály .....	9
2.5 Využití v praxi .....	11
2.6 Šíření slunečního záření atmosférou .....	12
2.7 Vliv infračerveného záření na člověka.....	14
2.8 Rozdíl zářivých a světelně-technických veličin .....	14
<b>3 Zdroje infračerveného záření.....</b>	<b>18</b>
3.1 Zdroje teplotní.....	18
3.2 Zdroje výbojkové .....	19
3.3 Zdroje luminiscenční – IR LED.....	20
<b>4 Snímače infračerveného záření.....</b>	<b>22</b>
4.1 Snímače neselektivní (tepelné) .....	22
4.1.1 Bolometry.....	22
4.1.2 Termoelektrické články .....	22
4.1.3 Dielektrický a pyroelektrický snímač.....	23
4.2 Snímače selektivní (fotoelektrické) .....	23
4.2.1 Fotodiody .....	23
4.2.2 Fotonky .....	23
4.2.3 Spektrometry .....	24

<b>5</b>	<b>Spektrální citlivost kamerových systémů.....</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Měření zářivých parametrů infrazářičů .....</b>	<b>29</b>
6.1	Použité infrazářiče, přístroje a rozbor měření.....	29
6.2	Infrazářič LL-60IR50 .....	33
6.3	Infrazářič LL-120IR50 .....	35
6.4	Infrazářič RL-100IR50.....	37
6.5	Infrazářič SP-26IR18.....	39
6.6	Infrazářič MX-50IR .....	41
<b>7</b>	<b>Porovnání čipů kamer pro optimální snímání.....</b>	<b>43</b>
7.1	Čip Sony ICX274.....	43
7.2	Čip Kodak KAF-3200 .....	44
7.3	Čip Kodak KAC-9619 .....	45
7.4	Čip Thorlabs DCC1645C .....	46
<b>8</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>52</b>



## 1 Úvod

S infračerveným zářením se člověk potýká již od dob minulých, respektive od starověku. Tehdy člověk ještě netušil, že se jedná o infračervené záření při dopadu slunečních paprsků na jeho kůži, nebo teplo vznikající při rozdělování ohně. První vědecké pokusy s infračerveným zářením byly prováděny teprve v 17. století. Prvním vědcem, který pojmenoval toto záření, díky pokusu s teploměry, byl Herschel na počátku 19. století. Svým pokusem dokázal, že za červeným slunečním spektrem stále teplota stoupá. Tento pokus byl tedy historickým průlomem v oblasti infračerveného záření. Otázkou bylo jak toto spektrum zviditelnit. Následovalo mnoho pokusů s IR zářením a začalo se pracovat na tom, jak by se dalo využít. Na počátku mělo infračervené záření největší využití v organické chemii a následně se rozšířilo do medicíny. Rozvoj technických oborů na sebe nenechal dlouho čekat a také zde našlo IR záření své uplatnění. Především v oblasti vytápění, technické diagnostice – infračervená termografie, strojové vidění, optická a bezdrátová komunikace a další, převážně průmyslové aplikace. Využití infračerveného záření v zabezpečovací technice je ale otázkou až moderní doby. K roku 1985 se datuje prodej prvních kamerových systémů a v roce 1990 se začaly využívat kamery pro kontrolu kvality v průmyslu. Ve své době byly tyto systémy velice ekonomicky nákladné a kvalita přeneseného obrazu se dnes prodáváním, ekonomicky dostupným kamerám nemohla rovnat. Nicméně tak je tomu se vším a záleží pouze na rychlosti a kvalitě vývoje.

Pro všechny kamerové systémy je důležité, aby byly schopny zaznamenat informace, na které již lidské oko není citlivé, a proto je nejsme schopni pozorovat. Jedná se především o situace za tmy. Kamerové systémy pracují se zářivými parametry, na něž musí být senzor, respektive čip CCTV citlivý. Aby se energeticky maximálně optimalizoval diagnostický řetězec, je důležité toto přizpůsobení čipů kamer vyhledat a posoudit. Proto se v této práci zabývám právě měřením zářivých parametrů infrazářičů, respektive měřením zářivého toku a spektrálního vyzařování IR LED. Měření zářivého toku v prostoru - vyzařovací charakteristiky - jsou důležité pro volbu infrazářičů pro danou aplikaci. Jedná se o kvantitativní parametr, který nám názorně ukazuje směr vyzařování, popřípadě množství zářivého toku dopadajícího na ozařovanou plochu. Jestliže máme navrhnuť přisvětlení pomocí infrazářičů, je nutno zvolit vhodnou kameru s dostatečně citlivým čipem, aby vyzařované spektrum byl schopen zhodnotit. Zhodnocení je možno chápat jako přenos, kterým je čip posuzován z hlediska spolupráce čipu kamery a IR LED. Cílem práce je navrhnout a porovnat několik čipů, standardně používaných v dnešních diagnostických kamerách, či CCTV spolupracujících s IR přísvitem a na základě přenosu čipů kamery posoudit, zda-li je senzor vhodný pro snímání v IR oblasti spektra či nikoli.

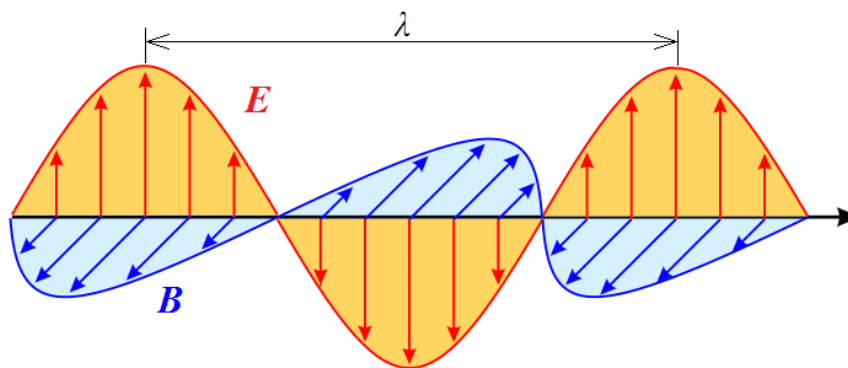
V dnešní době se pro diagnostiku a CCTV používají převážně senzory kamer na bázi CCD a CMOS. CCD čipy se začaly v roce 1975 používat v televizních kamerách a později v různých čtečkách čárových kódů, skenerech a dnes především digitálních fotoaparátech, kamerách pro strojové vidění a CCTV. Naproti tomu s CMOS čipy pro snímání se sice začalo experimentovat již v 70. letech 20. století, ale teprve počátkem 90. let se začal vývoj těchto čipů pro běžné použití ve snímací technice. Vývoj jak CCD, tak CMOS čipů probíhal u Bell Laboratories v New Jersey v USA.

## 2 Infračervené záření

Kapitola zaměřená na objasnění problematiky IR záření, samotný objev tohoto záření, jeho postupný vývoj, vlastnosti, působení IR záření na člověka a jeho využití v praxi. Konec kapitoly je věnován rozdílu zářivých a světelně-technických veličin, jehož pochopení je pro tuto práci velmi důležité.

### 2.1 Charakteristika infračerveného záření

Fyzikální podstata vlnové složky IR záření je totožná, jako pro složky viditelného záření, ultrafialového, kosmického, záření  $\gamma$  a dalších. Podstatou všech záření je fyzikální děj, který má dvojí povahu – vlnovou (undulační) a částicovou (korpuskulární). První jsou elektromagnetické vlny tvořené kmity intenzity elektrického pole  $E$  a druhé intenzity magnetického pole  $H$ . Kmity obou těchto vektorů probíhají v rovinách k sobě kolmých a ve stejné fázi, viz obr. 2.1.

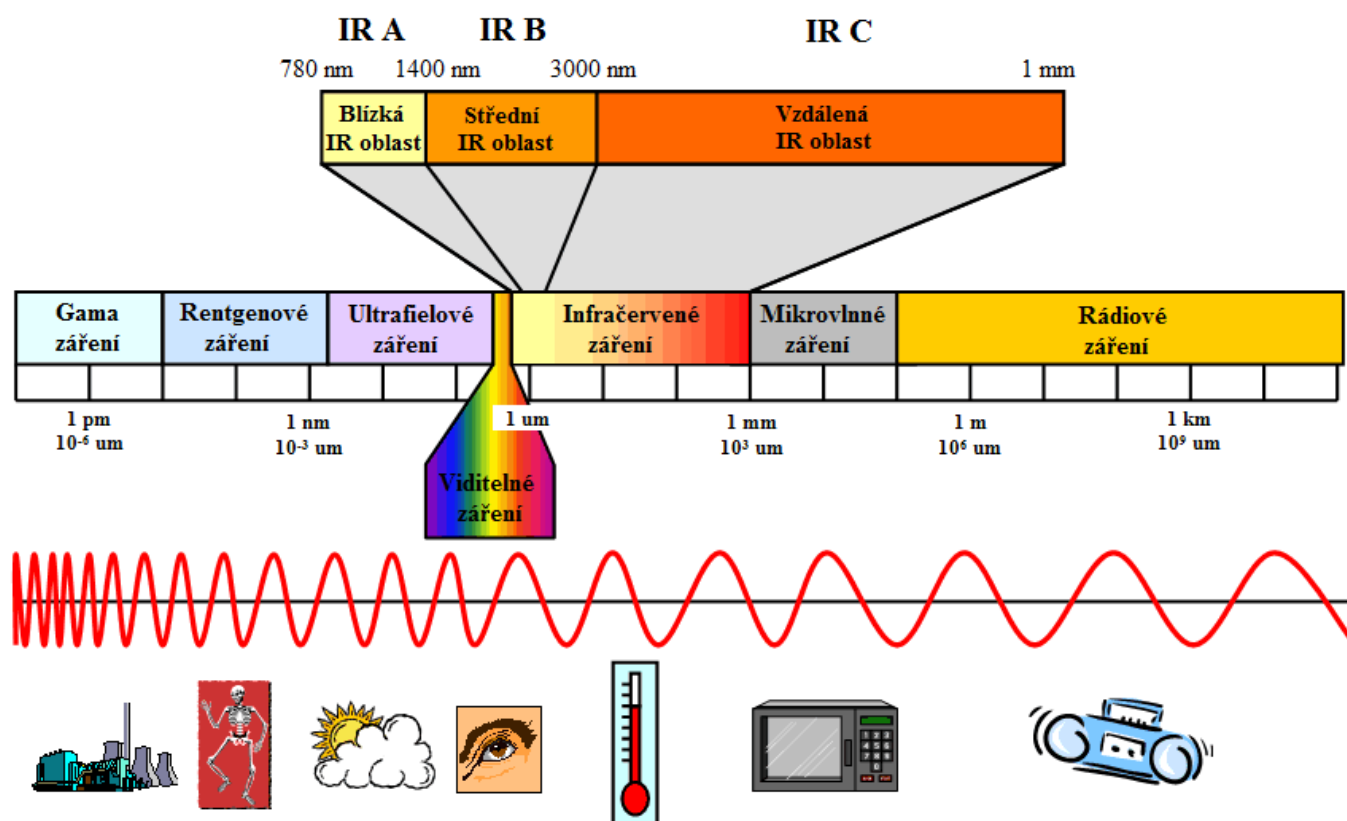


obr. 2.1: Elektromagnetické vlny tvořící složky  $E$  a  $B$ . [4]

Jednotlivé záření se od sebe liší pouze vlnovou délkou ( $\lambda$ ). Elektromagnetické záření má však vedle vlnového charakteru též charakter částicový. Ten si můžeme představit jako proud jednotlivých částic – fotonů. Undulační charakter záření se projevuje zřetelně v oboru delších vln, kdežto korpuskulární v oboru kratších vln.

Na obr. 2.2 je schematicky znázorněno celé elektromagnetické spektrum s vyznačenými obory jednotlivých druhů záření. Jak lze vidět, IR oblast zabírá ve spektru podstatně větší rozsah, než je tomu u viditelného záření. Konkrétně se nachází za hranicí viditelného světla ( $\lambda = 780$  nm) a před hranicí mikrovlnného záření ( $\lambda = 1$  mm). Široký rozsah IR záření se dělí na:

Blízká infračervená oblast (IR A):	$\lambda = 780$ nm až 1400 nm
Střední infračervená oblast (IR B):	$\lambda = 1400$ nm až 3000 nm
Vzdálená infračervená oblast (IR C):	$\lambda = 3000$ nm až 1 mm



obr. 2.2: Elektromagnetické spektrum s vyznačeným rozsahem IR záření. [5]

Takovéto dělení je výstižné pro zdroje a snímače IR záření. V blízké IR oblasti se používají stejné prostředky jako v rozsahu viditelného záření, v střední IR oblasti jen některé stejné prostředky a ve vzdálené IR oblasti jen prostředky tepelné.

## 2.2 Historie infračerveného záření

Poznatky o IR záření byly získávány a objasňovány velice pomalu, v průběhu několika století. Detailněji se zaměřím na experiment slavného německého astronoma Sira Fredericka Williama Herschela, jež je považován za hlavní ikonu v objevu týkající se dané problematiky.

### Pokusy před Herschelem

První pokus s IR zářením z vědecko-technického hlediska provedli studenti Galileiho v 17. století. Zkoušeli „soustředit chlad“ ze vzdáleného ledového bloku pomocí zrcadel.

V 18. století byly prováděny podobné pokusy o přenos tepla na vzdálenost za použití dvou souosých dutých zrcadel. Do ohniska jednoho z nich byla vložena dutá kovová koule naplněná horkou vodou a do druhého zrcadla byl umístěn teploměr se začerněnou baňkou. Bylo pozorováno, že teplota stoupala. Pokus byl posléze obměněn tak, že do prvního ohniska byla vložena nádoba s mrazicí směsí. V tomto případě teplota klesala.

Na rozhraní 18. a 19. století je nutno zmínit pokus J. Leslieho, který užil jako zdroje IR záření mosazné krychle, taktéž znám pod názvem „Leslieova kostka“. Čtyři boční stěny této kostky měly vnější povrch různě opracovaný. Do krychle nalil vařící vodu. Jako přijímač použil velmi citlivý vzduchový diferenciální teploměr. Tímto zařízením studoval zářivost, odrazivost a pohltivost IR záření.

### Herschelův experiment

Do roku 1800 se dosud prováděné experimenty a práce zabývaly studiem tepelného účinku spektrálně nerozděleného světla a IR záření. I když veškeré pokusy byly vlastně prováděny s IR zářením, nebylo ještě žádné představy o jeho existenci a odlišení od světla a tepla. Tyto dva pojmy byly doposud nazývány nejasným pojmem „zářivé teplo“.

W. Herschel ve výše zmíněném roce zkoumal tepelný účinek v jednotlivých barevných oblastech slunečního spektra, které získal rozkladem pomocí skleněného hranolu. Pokus provedl tím způsobem, že do různých míst spektra vkládal teploměr a teplotu porovnával s teplotou teploměru umístěného ve stínu. Zjistil, že teplota stoupá od fialového konce spektra k červenému konci, nicméně maximum našel až za koncem červené oblasti. Tímto experimentem prokázal Herschel existenci neviditelného IR záření ve slunečním spektru za jeho červeným koncem na základě tepelného účinku – proto bylo záření pojmenováno zářením tepelným, kteréhož názvu se přes jeho fyzikální nepřesnost dodnes ještě občas užívá.

Na základě studování optických vlastností IR záření Herschel dospěl k závěru, že podléhá týmž zákonům lomu a odrazu jako světlo. Nicméně dospěl k různým výsledkům, co se týče propustnosti IR záření různými materiály. Tento problém souvisel rovněž s látkou hranolu, ze které byl vyroben – maximum tepelného účinku se s různým materiálem nacházel na různých vlnových délkách.



**obr. 2.3:** Demonstrace Herchelova objevu IR záření rozkladem slunečního spektra přes skleněný hranol. [6]

Mezi další významné průkopníky v oboru IR patří L. Nobili, M. Melloni, kteří dále pracovali na základě poznatků Herschela.

## 2.3 Záření černého tělesa a jeho zákony

IR záření je rovnovážné záření, které vzniká při změnách teploty soustavy těles.

Pro názornost mějme soustavu těles s různou teplotou, jež je izolovaná od svého okolí. Výměnou teplot mezi tělesy se soustava dostává do rovnováhy. Vyrovnávání teplot v soustavě těles vyjadřuje první termodynamická věta. Podle druhé termodynamické věty soustava těles nemůže přejít ze svého rovnovážného stavu do jakéhokoli jiného stavu. Jinak řečeno, plošný element každého tělesa vytvořené soustavy pohltí tolik zářivé energie, kolik vyzaří.

Absolutně černé těleso (dále jen AČT) je jediným teplotním zdrojem, jehož zákony záření byly přesně matematicky definovány. V dalším textu jsou uvedeny hlavní zákony, jež udávají závislost celkového vyzařovaného výkonu na teplotě, závislosti vlnové délky maxima záření na teplotě a spektrální rozložení záření.

### 2.3.1 Kirchhoffův zákon

V roce 1860 odvodil Kirchhoff svými úvahami, že poměr intenzity vyzařování  $M_e$  a poměrné pohltivosti  $\alpha$  libovolného tělesa při IR záření nezávisí na vlastnostech tohoto tělesa a je pro všechna tělesa funkcí  $f(T)$  absolutní teploty tělesa  $T$ . Matematicky lze tento vztah vyjádřit v tomto tvaru:

$$\frac{M_e}{\alpha} = f(T) \quad (2.1)$$

Jak již bylo řečeno, tento zákon platí pro libovolné těleso, čímž platí stejně pro tělesa libovolného chemického složení, stavu povrchu atd. Kirchhoff dále ukázal, že obdobný vztah platí při IR záření libovolného tělesa mezi jeho spektrálními veličinami, tedy mezi monochromatickým vyzařováním  $M_\lambda$  a poměrnou spektrální pohltivostí  $\alpha_\lambda$ . Matematicky lze tento vztah vyjádřit v tomto tvaru:

$$\frac{M_\lambda}{\alpha_\lambda} = f(T, \lambda) \quad (2.2)$$

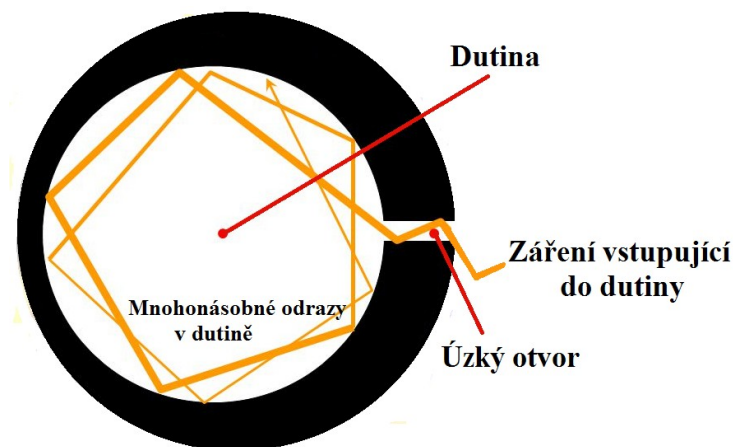
A možno jej vyslovit takto: Poměr monochromatického vyzařování  $M_\lambda$  a poměrné spektrální pohltivosti  $\alpha_\lambda$  teplotního záření libovolného tělesa nezávisí na vlastnostech takového tělesa a je pro všechna tělesa stejnou funkcí – absolutní teploty tělesa  $T$  a vlnové délky  $\lambda$ . Uvedená funkce je rovna monochromatickému vyzařování  $M_{0\lambda}$  absolutně černého tělesa při téže teplotě  $T$  a vlnové délce  $\lambda$ .

### 2.3.2 Absolutně černé těleso

Pozorujeme-li různá osvětlená tělesa, jež sama světlo nevydávají, potom tělesa, jejichž povrch odráží světlo méně, se jeví tmavší. Odrážejí-li tato tělesa pouze několik procent dopadajícího světla, jeví se nám černá. Nejdokonalejší černě odrážejí pouze přibližně 1% světla. Dovedeme realizovat i tělesa, která odrážejí pouhý zlomek světla na něj dopadajícího – jeví se proto ještě černější. Takováto tělesa lze realizovat pomocí malých otvorů ve všestranně uzavřené dutině.

Absolutně černé těleso je možno aproximovat dutinovým zářičem s velmi malým otvorem.

Zářivý tok, který otvorem dopadne do dutiny, se mnohonásobným odrazem dokonale pohltí. Pokud se v dutině udržuje konstantní teplota, nachází se dutinový zářič v termodynamické rovnováze. Proto otvor modelu AČT, který dopadá všechno dopadající záření, je zároveň zdrojem záření. Množství vyzářené energie se hodnotí pomocí spektrální hustoty záření, definované jako množství energie připadající na jednotkový interval vlnové délky. AČT bylo odvozeno na základě zákona Kirchhoffa.



**obr. 2.4:** Realizace AČT všestranně uzavřenou dutinou s úzkým otvorem. [7]

Obecně se AČT definuje jako ideální těleso, které pohltí veškeré dopadající záření na něj dopadající (pro všechny vlnové délky) a má absolutně černý povrch. Jedná se současně o ideální zářič, ze všech možných těles o stejné teplotě vysílá největší možné množství zářivé energie. AČT má pohltivost  $\alpha = 1$ , kdežto pohltivost všech prvků v přírodě (taktéž označovaná jako šedá tělesa) je vždy menší než 1. Odraznost vzhledem ke skutečnostem popisovaných již dříve je  $\rho = 0$ .

Kirchhoffovy zákony (2.1) a (2.2) nabývají pro AČT zvláště jednoduchých tvarů, a to

$$M_0 = f(T) \quad (2.3)$$

nebo

$$M_\lambda = f(T, \lambda) \quad (2.4)$$

kde  $M_0$  značí intenzitu vyzařování AČT a  $M_\lambda$  jeho monochromatické vyzařování.

### 2.3.3 Stefanův-Boltzmannův zákon

Zákon, který experimentálně získal Stefan v roce 1879 a teoreticky odvodil Boltzmann roku 1884, vyjadřuje závislost intenzity vyzařování AČT na jeho absolutní teplotě, respektive na čtvrté mocnině jeho absolutní teploty. Matematicky lze vztah formulovat následovně:

$$M_0 = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}, \text{K}^4) \quad (2.5)$$

kde hodnota Stefanovy-Boltzmannovy konstanty  $\sigma = 5,6687 \cdot 10^{-8} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$ .

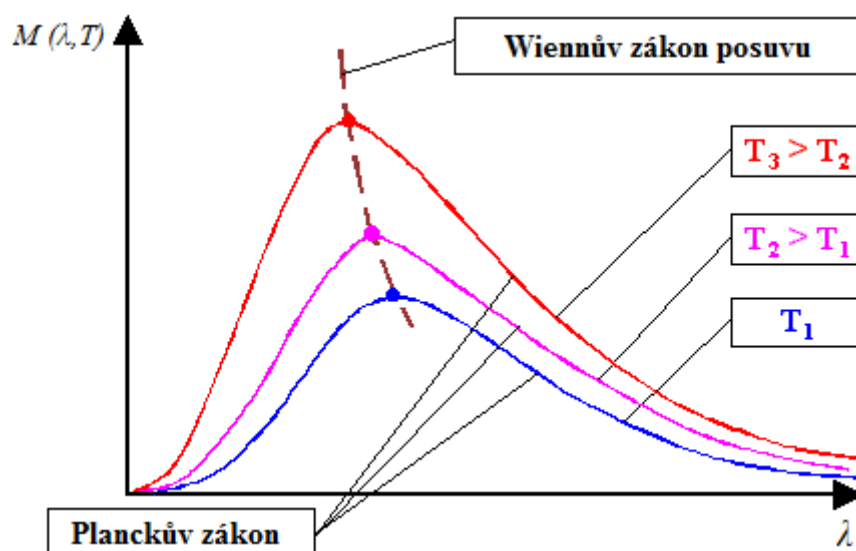
### 2.3.4 Wiennův zákon posuvu

Zákon odvodil W. Wien v roce 1896. Podle něj je vlnová délka  $\lambda_m$  maximálního monochromatického vyzařování AČT nepřímo úměrná jeho absolutní teplotě. Matematicky lze zákon interpretovat jako:

$$b = \lambda_m \cdot T \quad (\text{m} \cdot \text{K}; \text{m}, \text{K}) \quad (2.6)$$

kde konstanta  $b = 2,89782 \cdot 10^{-3} (\text{m} \cdot \text{K})$

S rostoucí teplotou se maximum monochromatického vyzařování posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. To má za následek například to, že hodně teplá tělesa mohou mít značnou část záření ve viditelném spektru. Naopak chladná tělesa se nacházejí v oblasti neviditelného IR záření na delších vlnových délkách. Wiennův posuvací zákon pro 3 různé teploty těles je zobrazen na obr. 2.5.



obr. 2.5: Wiennův zákon posuvu a zákon Planckův. [8]

### 2.3.5 Planckův zákon

Zákon odvodil M. Planck v roce 1900. Vyjadřuje závislost spektrální hustoty záření na teplotě a vlnové délce. Při odvozování zákona záření černého tělesa vyslovit předpoklad, že záření vzniká tepelnými pohyby hmotných částic (atomů, molekul, iontů). Dle Plancka výměna energie mezi tělesem a zářením není spojitá, ale uskutečňuje se po menších množstvích, tzv. kvantách energie.

Pro monochromatické vyzařování AČT odvodil Planck výraz:

$$M_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (2.7)$$

kde  $c_1$  a  $c_2$  jsou konstanty, které závisí pouze na univerzálních fyzikálních konstantách:

$$c_1 = 2 \pi h c^2, \quad c_2 = \frac{hc}{k} \quad (2.8)$$

kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu  
 $h$  je Planckova konstanta  
 $k$  je Boltzmannova konstanta

Číselné hodnoty konstant  $c_1$  a  $c_2$  jsou:

$$c_1 = 3,74127 \cdot 10^{-16} \text{ (W} \cdot \text{m}^2 \text{)} \quad (2.9)$$

$$c_2 = 1,43880 \cdot 10^{-2} \text{ (m} \cdot \text{K)} \quad (2.10)$$

Na obr. 2.5 je pro Planckův zákon vidět, že křivka (izoterma) pro vyšší teplotu leží zcela nad izotermou pro teplotu nižší. Na diagramu lze rovněž vidět posuv maxim izoterm se vzrůstající teplotou ke kratším vlnovým délkám, jak bylo řečeno již dříve, jedná se o zákon posuvu dle Wienna.

## 2.4 Optické vlastnosti látek v infračerveném oboru

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, fyzikální podstata IR záření a viditelného záření je totožná. Proto také pro IR záření platí stejné optické zákony, jako pro světlo. Po stránce kvantitativní však jeví látky v IR oblasti (vzhledem k rozdílné vlnové délce) podstatné rozdíly v optických vlastnostech vůči oblasti viditelné. Jako příklad lze uvést optické sklo, které světlo dokonale propouští, avšak ve většině IR oboru je zcela nepropustné. Naopak některé látky pro světlo nepropustné jsou v určitých vlnových délkách IR oboru dokonale propustné. Podobně jeví látky rozdíly v odrazivosti, velikosti indexu lomu atd. To má pro IR techniku a její aplikace řadu významných důsledků, někdy nepříznivých, jindy naopak příznivých.



### 2.4.1 Nejužívanější optické materiály

Výhradním materiálem k výrobě optických členů (čoček, hranolů atd.), pro obor světla je sklo. V IR oboru lze optického skla užít při tloušťkách kolem 10 cm, které přichází v úvahu u hranolů a optických soustav pouze do vlnové délky 2 až 2,4  $\mu\text{m}$ , kde začíná toto sklo silně absorbovat.

Klasickým a zároveň dominujícím optickým materiálem pro výrobu hranolů a čoček byla kamenná sůl ( $\text{NaCl}$ ), jejíž velkou propustnost pro IR oblast objevil M. Melloni v roce 1834. V této době byly k dispozici pro IR oblast pouze tyto materiály: kamenná sůl, kazivec, sylvín. S výrobou optických materiálů byly značné problémy do doby, než se začaly syntetické krystaly pěstovat v průmyslovém měřítku. Takovéto krystaly měly značné výhody vůči svým minerálním předchůdcům.

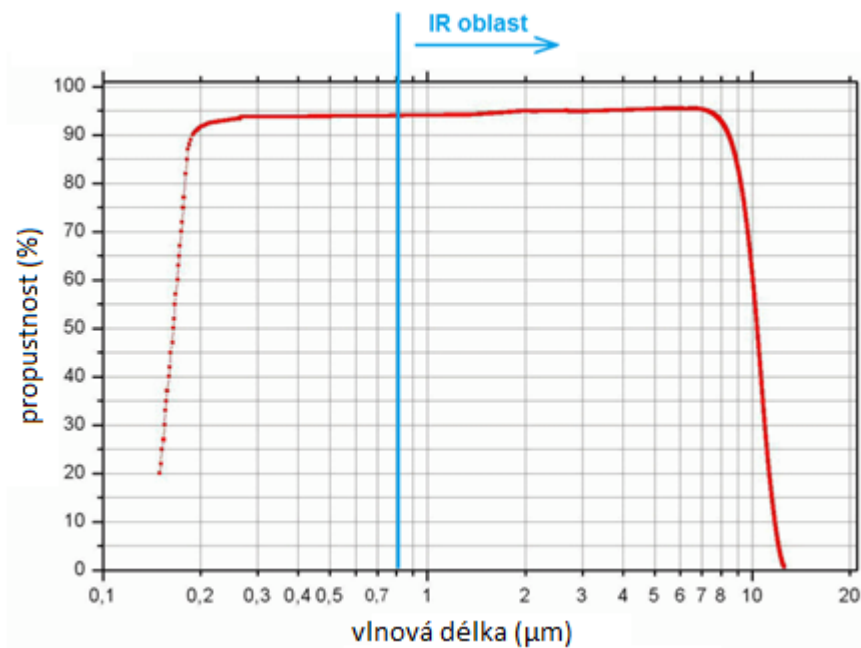
Ačkoli dnes existuje mnoho druhů IR materiálů, jen hrstka se používá k výrobě optických členů. V následující tabulce jsou uvedeny dnes používané materiály. Každý z nich má své jedinečné vlastnosti, kterými se vzájemně odlišují. Dále jsou zde uvedeny oblasti pro konkrétní aplikace.

**tab. 2.1:** Materiály, jejich vlastnosti a využití v IR oboru. [9]

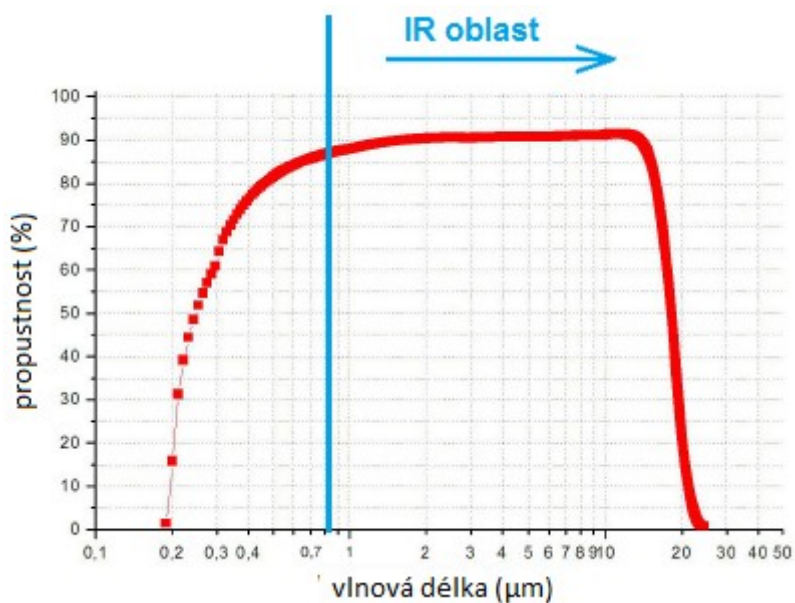
Materiál	Vlastnosti	Využití - aplikace
Fluorid vápenatý ( $\text{CaF}_2$ )	nízká absorpce, vysoký index lomu	spektroskopie, výroba polovodičů
Křemíkové sklo (FS)	nízký koeficient tepelné roztažnosti, vynikající přenos v celé oblasti IR	spektroskopie, laserová technika
Germanium (Ge)	vysoká odrazivost a tvrdost, vynikající přenos z oblasti IR B do IR C	termovize, diagnostika povrchů
Fluorid hořečnatý ( $\text{MgF}_2$ )	vysoký koeficient tepelné roztažnosti, nízký index lomu, dobrý přenos z oblasti viditelné do IR B	optická okna, čočky
N-BK7	levný materiál, dobrý přenos v oblasti viditelné a IR A	průmyslové aplikace, strojové vidění, mikroskopy
Bromid draselný (KBr)	dobrá odolnost vůči mechanickým rázům, rozpustný ve vodě, široký rozsah přenosu	infračervená spektroskopie
Safir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	odolný, trvalý materiál, dobrý přenos v celé oblasti IR	IR laserové systémy, spektroskopie měření v nebezpečném prostředí
Křemík (Si)	levný materiál	spektroskopie, lasery v oblasti IR B, zdravotnictví
Chlorid sodný (NaCl)	levný materiál, rozpustný ve vodě, vynikající převod z oblasti 250 nm do 16 $\mu\text{m}$ , citlivý na tepelný šok	infračervená spektroskopie

Selenid zinečnatý (ZnSe)	nízká absorpce, vysoká odolnost proti tepelným šokům	CO <sub>2</sub> lasery, termovizní snímky
Sfalerit (ZnS)	vynikající přenos v oblasti viditelné i IR, tvrdší a chemicky stálější než ZnSe	termovize

Na grafech níže je znázorněna propustnost fluoridu vápenatého a chloridu sodného naměřená v laboratorních podmínkách výrobce optických materiálů.



**Obr. 2.6:** Propustnost optického materiálu CaF<sub>2</sub>. [21]



**Obr. 2.7:** Propustnost optického materiálu NaCl. [21]

## 2.5 Využití v praxi

IR záření má v praxi nespočet uplatnění, proto zde budou uvedeny pouze hlavní z nich.

### Technická diagnostika

#### Infračervená termografie

Zabývá se analýzou rozložení teplotního pole na povrchu tělesa a to bezkontaktním způsobem. Úkolem termografie je analýza IR záření vyzařované daným tělesem. Termografickým měřicím systémem lze zobrazit teplotní pole měřeného objektu na jeho povrchu. Obor termografie se rozvinul společně s rozšířením infračervených kamer - termovizní kamery. Ty umožňují vizualizaci infračerveného záření - výstupem z termovizní kamery je termovizní snímek, který uživateli umožní určit teplotu v jednotlivých bodech termogramu. Tohoto se zpravidla využívá při hledání úniků tepla z budov, detekce přehřívání strojů a závad snižující životnost zařízení, detekci zánětů pod kůží, detekci pohybu osob v zabezpečených objektech – noční vidění a další aplikace.

#### Strojové vidění

Průmyslová kamera se speciálním IR filtrem zaznamenává obraz nasvětlovaného předmětu v IR oblasti (monochromatické záření IR LED o vlnové délce 850 nm) pro kontrolu defektů a chybějících částí při kontrole kvality zkoumaných objektů. Jedná se o aplikace, které vyžadují, aby světlo pronikalo materiálem, například plastem, a bylo vidět skrze něj. Takto lze odhalit například defekty v pouzdře tranzistoru či integrovaného obvodu při samotné výrobě. To má za následek snižování nákladů a zvyšování kvality výrobků. Výrobce pak může svým zákazníkům nabídnout vyšší kvalitu za nižší cenu.

#### Komunikace - bezdrátová

Pro komunikaci se využívá protokol IrDA, který popisuje bezdrátovou komunikaci pomocí infračerveného záření. IrDA byl vytvořen pro komunikaci s přenosnými zařízeními bez nutnosti použití komunikačního kabelu. IrDA vysílá a přijímá modulované infračervené záření o vlnové délce 875 nm. Vysílačem jsou infračervené LED diody (nebo infračervené laserové diody). Přijímačem jsou fotodiody. IrDA je součástí notebooků, mobilních telefonů atd. V současné IrDA překonal Bluetooth, který eliminuje základní nevýhodu infračerveného přenosu – potřebu přímé viditelnosti.

IR LED našly široké uplatnění v dálkových ovladačích spotřební elektroniky (TV, videa, domácí kina, satelity, projektory).

#### Komunikace – optická

Optická telekomunikace je zprostředkována pomocí optických vláken (skleněných, nebo plastových), ve kterých se šíří elektromagnetické vlny (zpravidla světelné či IR záření) ve směru osy vlákna s využitím principu totální reflexe na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. Optická vlákna se využívají pro přenos na delší vzdálenosti při vyšších přenosových rychlostech, než jiné formy komunikace. Vláknata jsou ohebná, mohou být svázaná do svazků jako kabely. Optické kabely nejsou elektricky vodivé, což je dobré řešení pro ochranu komunikačních zařízení umístěných

na přenosové soustavě vysokého napětí a kovových konstrukcích náchylných na úder blesku. Mohou být také použity v prostředích, kde jsou přítomny výbušné výpary, bez nebezpečí vznícení.

#### **Telekomunikační pásma dle standardu:**

O-pásmo (Original)	1260 - 1360 nm,	$f = 238 - 220$ THz
E-pásmo (Extended)	1360 - 1460 nm,	$f = 220 - 206$ THz
S-pásmo (Short wavelength)	1460 - 1530 nm,	$f = 206 - 196$ THz
C-pásmo (Conventional)	1530 - 1565 nm,	$f = 196 - 191$ THz
L-pásmo (Long wavelength)	1565 - 1625 nm,	$f = 191 - 185$ THz
U-pásmo (Ultra)	1625 - 1675 nm,	$f = 185 - 179$ THz

#### **Lékařství**

Na lidský organismus má IR záření celou řadu pozitivních účinků, jak již bylo zmíněno – způsobuje rychlejší lymfatické odvodňování i lepší prokysličením a výživu tkáně, zlepšuje regeneraci, hojení a účinně působí proti stárnutí kůže – fotonová terapie. Svalstvo se lépe uvolňuje, což má ve svých důsledcích i blahodárný vliv na psychiku. Infračervené paprsky urychlují pohyb elektronů po oběžných drahách a vyvolávají tepelný efekt. Teplo infračervených paprsků, pronikajících do tkání, urychluje jejich výměnu a zvyšuje schopnost leukocytů pohlcovat choroboplodné mikroby. Toto záření také tiší bolest a má uklidňující účinky, což přispívá k odstranění zánětlivých procesů. Za zmínku zde stojí uvést infrasauny, které není problém si v dnešní době pořídit i do domácnosti.

#### **Vytápění, sušení**

Široké využití v tomto oboru má především pro svou jednoduchost, spolehlivost a dobrou účinnost. Elektrické infrazářiče patří z hlediska předávání tepla sáláním k neefektivnějším způsobům vytápění. Infrazářiče jsou používány především pro sušení laků v automobilovém průmyslu, sušení v průběžných pecích, v keramickém průmyslu, v textilním průmyslu atd. Ve všech těchto případech se jedná o sušení velkých ploch malé tloušťky. V zemědělství se používá v podobě umělých líhní a při sušení zrna.

#### **Kriminalistika**

Využívá se zde principu rozdílné pohltivosti a odrazivosti IR záření hmotami na pohled stejnými, neboť umožňuje zjistit jeho pravost bez porušení předmětu doličného. Jedná se převážně o cenné bankovky, papíry, vzácné obrazy, rovněž lze zviditelnit odstraněné tetování, stopy krve na tmavých tkaninách. V neposlední řadě je nutno zmínit, že CCD snímače v digitálních kamerách jsou na IR záření citlivé, proto jsou IR zdroje (IR LED) nedílnou součástí některých bezpečnostních kamerových systémů

## **2.6 Šíření slunečního záření atmosférou**

Šíření IR záření v atmosféře závisí na konkrétních meteorologických podmínkách, především na vlhkosti atmosféry, tj. množství par a kapek vody v atmosféře. To znamená, že šíření záření v atmosféře je různé za jasného počasí, při vzdušném oparu, při mlze a dešti.

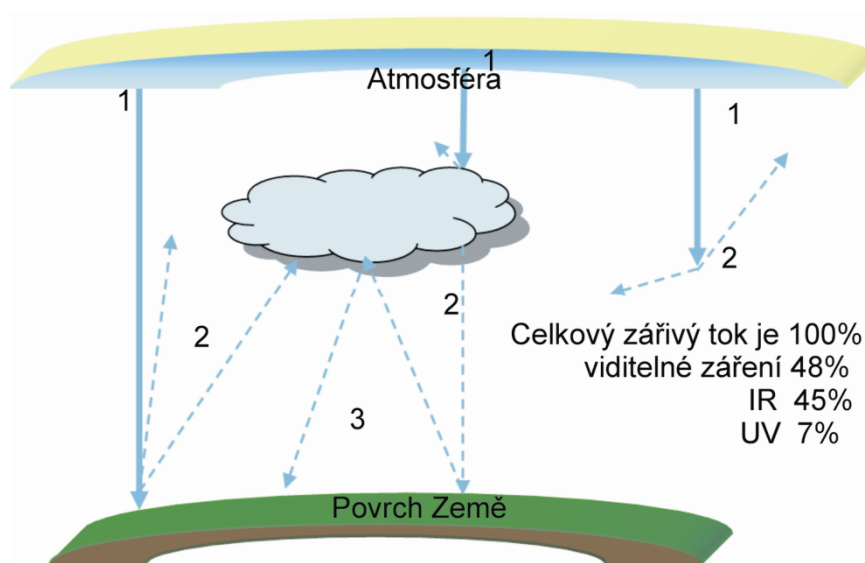
Šíření IR záření atmosférou se oslabuje v důsledku různých fyzikálních procesů:

- 1) Pohlcení molekulami plynů, které tvoří vzduchový sloupec atmosféry.
- 2) Rozptylu částicemi vzdušného oparu a částicemi, které tvoří mlhu a oblaka.
- 3) Rozptylu molekulami atmosférických plynů.

Sloupec atmosféry se skládá ze směsi různých plynů, především dusík (78 %), kyslík (21 %) a v malém množství obsahuje i vzácné plyny. Zemská atmosféra obsahuje vodní páru v nejrůznějším množství, které závisí na teplotě a tlaku vzduchu. Mimo to jsou v atmosféře přítomny nejrůznější částice pevného, nebo kapalného skupenství – prach, kapky vody. Někdy atmosféra obsahuje malé krystalky ledu.

Pohlcení záření v atmosféře je velmi selektivní. Sloupec atmosféry je filtr, který oslabuje záření velmi nerovnoměrně pro různé vlnové délky. Ve spektru záření, procházející sloupem atmosféry, je řada absorpčních pásů, které způsobuje vodní pára, oxid uhličitý a další plyny (ozón, metan atd.) Největší pohlcení IR záření způsobuje vodní pára, jejíž absorpční pásy se překrývají s početnými absorpčními pásy jiných plynů, obsažených ve spodní vrstvě atmosféry.

Na následujícím obrázku je znázorněn průchod slunečního záření atmosférou.



**obr. 2.9:** Průchod slunečního záření atmosférou včetně různých odrazů. [10]

#### Popis obrázku 2.9:

- 1 - sluneční záření absorbované atmosférou
- 2 - difúzní sluneční záření po odrazech od různých překážek (např. povrch Země, oblaka, atmosféra)
- 3 - vícenásobný odraz difúzního záření

## 2.7 Vliv infračerveného záření na člověka

Obecně platí, že při reakci záření se živou tkání se toto záření částečně odráží, částečně je absorbováno anebo tkání proniká. Biologická reakce tkáně závisí na parametrech záření (intenzitě a vlnové délce záření), době působení a na biologických vlastnostech i velikosti zasažené tkáně.

Riziko pro nás představují většinou umělé zdroje. Jedná se o takové množství absorbované energie, jež překračuje práh energetického poškození lidské tkáně a tím může dojít k akutní újmě na zdraví. Převážně se jedná o orgány na povrchu lidského těla – zrak, pokožka.

IR záření vnímá člověk převážně povrchem těla jako působení tepla. Záření proniká do pokožky a do svalů, což má za následek lepší prokrvení.

U pokožky dochází v pásmu IR A záření z větší části k jejímu odrazu nebo průniku. V oblasti IR B, IR C záření dochází k pohlcení většiny energie, kde také může dojít k jejímu popálení. Na rozdíl od zraku jsme varováni tepelnými receptory, které vyvolávají pocit bolesti. Infračervené záření způsobí při opalování ihned nastupující zčervenání kůže – rozšíření cév.

U zraku je v pásmu IR A záření největší riziko koncentrace energie na sítnici, v pásmu IR B a IR C v rohovce. V obou případech může dojít k jejich popálení. Nepříznivou skutečností je, že jsou receptory poškozeny bez varování a může vzniknout i trvalé poškození zraku popř. zákal.

Jestliže toto záření proniká okny do interiéru v chladných obdobích roku, je zdrojem energetických zisků a může přispívat k vytápění budovy, což člověk určitě ocení. Naopak je tomu v letních měsících, kdy je toto působení příčinou nadměrného vzestupu teploty ve vnitřním prostoru budovy.

## 2.8 Rozdíl zářivých a světelně-technických veličin

Na měření IR záření se používá soubor energetických veličin a jednotek. Jednotlivé definice, odborná terminologie a názvosloví tohoto díla vyhovují Mezinárodnímu světelně-technickému slovníku IEC (Mezinárodní elektrotechnická komise), CIE (Mezinárodní komise pro osvětlování) a normě ČSN IEC 50 (845). Na další straně je vypracovaná tabulka definující jednotlivé zářivé a světelně-technické veličiny.

tab. 2.2: Definice základních **zářivých veličin**, ze kterých jsou odvozeny **veličiny světelné**, dle normy ČSN ISO 80000-7\_01-10. [11]

Název	Veličina	Jednotka	Definice	
<b>Zářivý tok</b>	$\Phi_e$	(W)	$\Phi_e = \frac{dQ}{dt}$	kde $dQ$ je zářivá energie vyzařená, přenesená nebo přijatá během časového intervalu o trvání $dt$
<b>Světelný tok</b>	$\Phi$	(lm)	$\Phi = K_m \int_{380}^{760} \Phi_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) d(\lambda)$	kde $K_m$ je maximální poměrná spektrální světelná účinnost ( $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ), $\Phi_\lambda(\lambda)$ je spektrální zářivý tok, $V(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost a $\lambda$ je vlnová délka
<b>Zářivost</b>	$I_e$	( $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$ )	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	kde $d\Phi_e$ je zářivý tok vycházející ze zdroje v elementárním kuželu obsahujícím daný směr s prostorovým úhlem $d\Omega$
<b>Svítivost</b>	$I$	(cd)	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	kde $d\Phi$ je světelný tok vycházející ze zdroje v elementárním kuželu obsahující daný směr a mající prostorový úhel $d\Omega$
<b>Zář</b>	$L_e$	( $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$L_e = \frac{dI_e}{dA \cdot \cos \alpha}$	kde $dI_e$ je zářivost vyzařovaná z elementu povrchu o ploše $dA$ a úhel $\alpha$ je úhel mezi normálou k povrchu a daným směrem
<b>Jas</b>	$L$	( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos \alpha}$	kde $dI$ je svítivost elementu povrchu o ploše $dA$ a úhel $\alpha$ je úhel mezi normálou k povrchu a daným směrem
<b>Intenzita vyzařování</b>	$M_e$	( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	kde $d\Phi_e$ je zářivý tok opouštějící element povrchu s plochou $dA$
<b>Světlení</b>	$M$	( $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$M = \frac{d\Phi}{dA}$	světelný tok $d\Phi$ opouštějící element povrchu, dělený plochou $dA$
<b>Ozářenost</b>	$E_e$	( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	kde $d\Phi_e$ je zářivý tok dopadající na element povrchu s plochou $dA$
<b>Osvětlenost</b>	$E$	(lx)	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	kde $d\Phi$ je světelný tok dopadající na element povrchu s plochou $dA$

Je třeba poznamenat, že veličiny zářivosti  $I$ , záře  $L$  a intenzity vyzařování  $M$  vyjadřují fyzikální vlastnosti zdroje IR záření. Ve většině případů zdroje záření vyzařují v širokém rozsahu spektra, v důsledku čeho zavádíme spektrální hustoty zářivých veličin, které vyjadřují podíl zářivých veličin připadajících na nekonečně malý interval vlnových délek a rozsahu tohoto intervalu. Tímto způsobem můžeme určit např.:

$$\text{spektrální hustota zářivého toku:} \quad \Phi_{\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2.11)$$

$$\text{spektrální hustota zářivosti:} \quad I_{\lambda} = \frac{dI_e}{d\lambda} \quad (\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}) \quad (2.12)$$

$$\text{spektrální hustota intenzity vyzařování:} \quad M_{\lambda} = \frac{dM_e}{d\lambda} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}) \quad (2.13)$$

$$\text{spektrální hustota záře:} \quad L_{\lambda} = \frac{dL_e}{d\lambda} \quad (\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}) \quad (2.14)$$

Závislosti spektrální hustoty zářivých veličin na vlnové délce se nazývá křivka spektrálního složení dané zářivé veličiny.

Zářivý tok, který dopadá na povrch např. průsvitného tělesa, se částečně odrazí od povrchu, částečně projde tělesem a částečně se pohltí. Jestliže je těleso neprůsvitné, potom prakticky záření nepropouští. Podíly odraženého  $\phi_p$ , propuštěného  $\phi_t$  a pohlceného zářivého toku  $\phi_a$  a dopadajícího zářivého toku  $\phi$ , nazýváme činitel odrazu  $\rho$ , činitel prostupu  $\tau$  a činitel pohlcení  $\alpha$ . Jedná se o vztahy:

$$\rho = \frac{\phi_p}{\phi_e}, \quad \tau = \frac{\phi_t}{\phi_e}, \quad \alpha = \frac{\phi_a}{\phi_e} \quad (2.15)$$

Dále platí zákon zachování energie, čili:

$$\phi = \phi_p + \phi_t + \phi_a \quad (2.16)$$

a rovněž:

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (2.17)$$

Pro neprůsvitná tělesa má činitel prostupu hodnotu 0. V takovémto případě platí:

$$\rho + \alpha = 1 \quad (2.18)$$

K popisu světelně-technických vlastností materiálů se užívají následující spektrální činitelé:

spektrální činitel odrazu  $\rho(\lambda)$

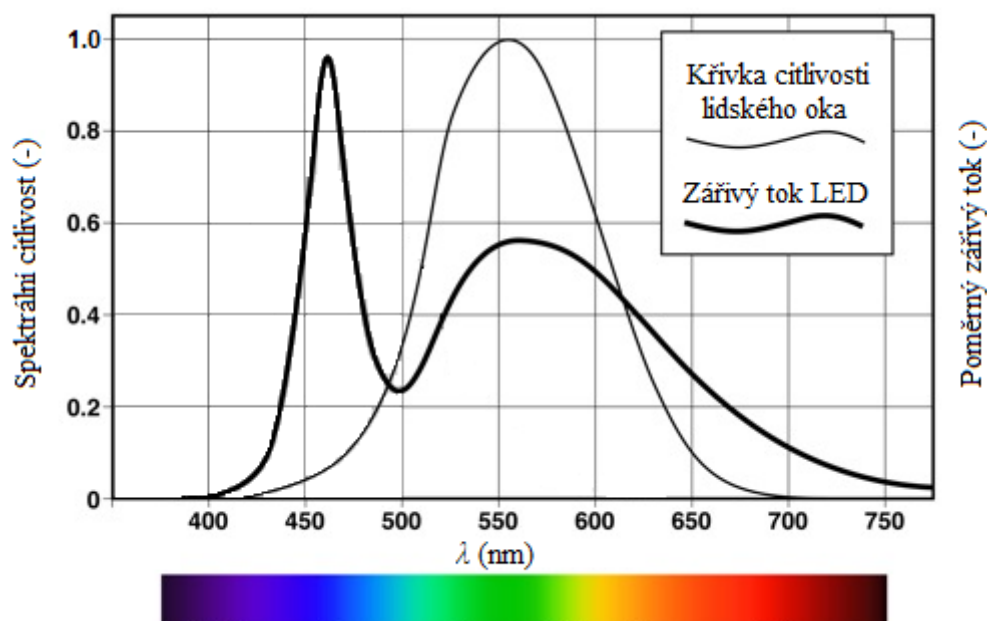
spektrální činitel prostupu  $\tau(\lambda)$

spektrální činitel pohlcení  $\alpha(\lambda)$

Pro tyto spektrální činitelé platí rovněž obdoba vztahu (2.17), tedy:

$$\rho(\lambda) + \tau(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1 \quad (2.19)$$



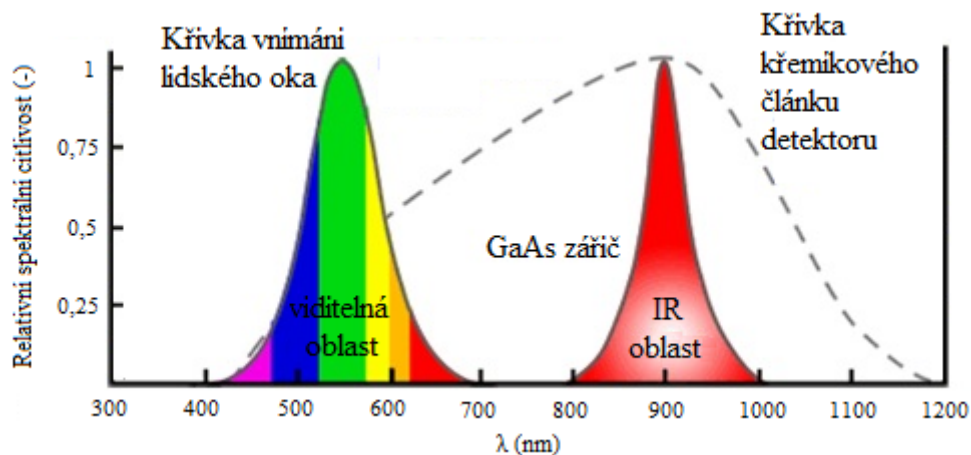


obr. 2.10: Zářivý tok LED a spektrální křivka citlivosti lidského oka. [12]

Výše uvedený obrázek znázorňuje zářivý tok LED a křivku citlivosti lidského oka. Tuto křivku si můžeme představit jako filtr, kterým prochází zářivý tok LED - oko tak reaguje a rozpoznává barvy na vlnových délkách od 380 (fialová) po 760 nm (červená). Matematický popis této operace pro získání světelného toku byl zmíněn již v tabulce 2.2:

$$\Phi = 683 \int_{380}^{760} \Phi_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d(\lambda)$$

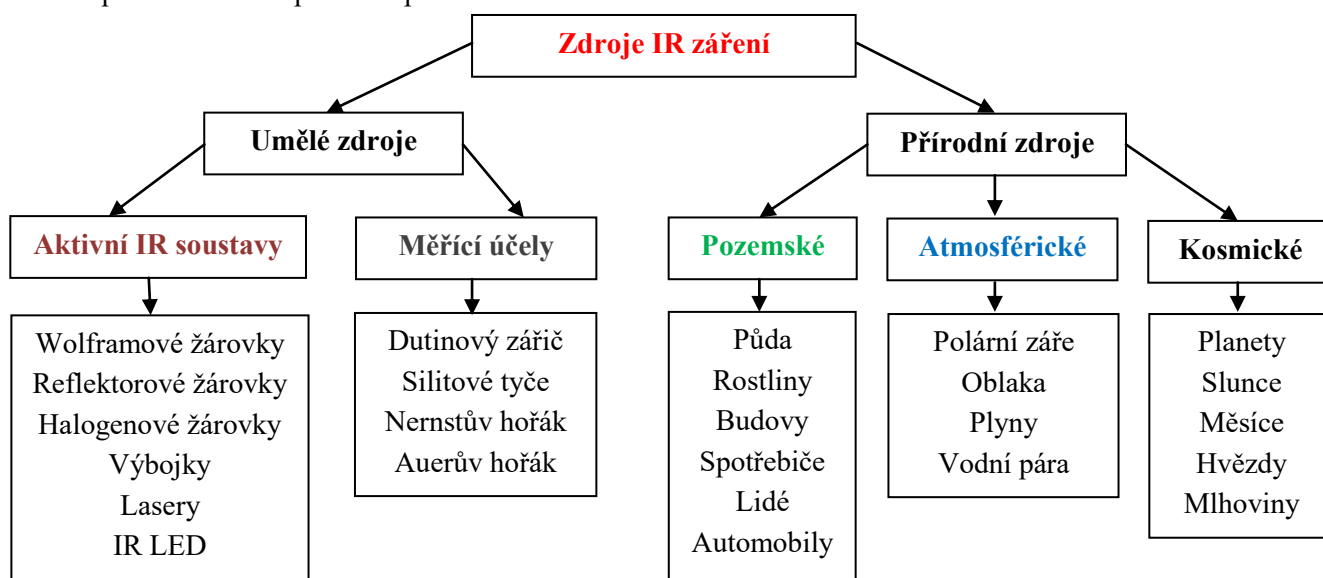
Pokud budeme mít zářič vyzařující v IR oblasti (nikoli ve viditelném spektru, jako na předchozím obrázku), křivka zářivého toku takového svítidla (IR LED) se bude nacházet mimo spektrum viditelného záření. Z tohoto důvodu musíme použít optického materiálu, který je na toto záření citlivý (př. křemíkový filtr), jak je znázorněno na následujícím obrázku.



obr. 2.11: Spektrální citlivost křemíkového článku detektoru pro IR zářič a spektrální citlivosti lidského oka. [13]

### 3 Zdroje infračerveného záření

Ve třetí kapitole jsou rozebrány jednotlivé zdroje IR záření. Blíže jsou rozepsány umělé zdroje záření, jež jsou důležité v praktickém využití. Kapitola je zaměřena účelně na IR LED, kterých se týká má praktická část diplomové práce.



obr. 3.1: Rozdělení zdrojů IR záření. [2]

#### 3.1 Zdroje teplotní

##### Žárovky s wolframovým vláknem

Jedná se o běžný světelný zdroj, donedávna hojně užívaný ve všech domácnostech. Wolfram má jako všechny kovy velkou odrazivost, tím pádem malou pohltivost. Žárovka s wolframovým vláknem je zdrojem záření v blízké IR oblasti a pracují s teplotami vlákna od 2500 až po 3500 K. Žářivost dosahuje jen zlomků žářivosti AČT téže teploty – spektrální emisivita wolframu závisí na teplotě vlákna a vlnové délce. Nejvýhodnějším zdrojem IR záření se jeví pro vlnovou délku 1  $\mu\text{m}$  při teplotě vlákna 3000 K, kdy dosahuje maxima záření. Se standardní skleněnou baňkou jich lze použít jako zdroj IR záření do vlnové délky asi 3  $\mu\text{m}$ , kdy začíná citlivá absorpce tohoto záření sklem baňky.

Výhodou je jednoduchá konstrukce, stálost zářivých hodnot v průběhu provozu a nízká cena.

V následující tabulce je porovnání wolframových žárovek, jež jsou naplněny různými plyny.

tab. 3.1: Žárovky s wolframovým vláknem plněné plyny. [2]

Energie záření (%)	vakuum	argon + dusík	dvojitě vlákno argon + dusík	krypton + xenon
Viditelné záření	7	10	12	13
IR záření	86	68	74	76
Ztráty v podpěrkách	7	3	2	2
Ztráty v plynu	0	19	12	9

### **Halogenové žárovky**

Tyto žárovky mají baňky z křemenného skla. Baňky jsou plněny argonem s příměsí určitého množství halogenu (jódu). V průběhu provozu wolfram, který se vypařuje z vlákna, usazuje se na stěnách baňky (provozní teplota baňky je v rozmezí 400 – 550 °C), kde reaguje s jodem na jodid wolframu, který postupuje zpět k vláknu (teplota vlákna je vyšší, než 2000 °C), kde se rozkládá na jod a wolfram. Wolfram se ukládá zpět na vlákno a jod se vrací do oběhu. Tímto cyklem se snižuje vypařování wolframu a prodlužuje se tak životnost žárovky.

Více než 90% zářivého toku halogenových žárovek je v IR oblasti v rozmezí vlnových délek 0,77  $\mu\text{m}$  až 3,8  $\mu\text{m}$ .

### **Uhlíkový oblouk**

Spektrum obloukovek se skládá ze spojitého spektra rozžhavených uhlíkových elektrod a ze spektra plynů, které vycházejí z elektrod napuštěných solemi kovů. Hlavním zdrojem záření je kráter (teplota asi 3800 K) na konci kladného uhlíku, který vysílá okolo 85 % zářivého toku. Oblouk mezi konci uhlíkových elektrod vysílá asi 5 % zářivého toku. Při obloukovkách s napuštěnými uhlíky jsou hlavním zdrojem záření plyny vycházející z elektrod. Uhlíkový oblouk se jako IR zářič užívá v laboratorních podmínkách a v praxi tedy nemá širší zastoupení.

Výhodou oblouku mezi dvěma uhlíky, jako zdroje IR záření, je jeho vysoká teplota v důsledku Planckova zákona též velká intenzita záření na všech vlnových délkách. Tato obloukovka má spektrum spojitě, s maximem vyzařování v blízké oblasti IR záření (oblast 0,7  $\mu\text{m}$  až 0,8  $\mu\text{m}$ ).

## **3.2 Zdroje výbojkové**

### **Rtuťové výbojky**

Jedná se o zdroj spojitého IR záření největších vlnových délek přibližně od 100 do 2500  $\mu\text{m}$ . Z fyzikálního hlediska se jedná o záření tepelné povahy, jež má svůj původ hlavně ve žhavých parách rtuťového oblouku – plazmatu, z části jde o záření horkých stěn baňky výbojky. Z tohoto hlediska se používají libovolné rtuťové výbojky s křemennou baňkou, nejefektivnější jsou výbojky s velmi vysokými tlaky. Poměr intenzit spektrálních čar rtuťových výbojek v UV, viditelném a IR oboru značně závisí nejen na samotném tlaku rtuťových par, ale i na elektrických hodnotách výbojky.

### **Nízkotlaké cesiové výbojky**

Tyto výbojky jsou velmi účinným zdrojem monochromatického IR záření na vlnových délkách 852 nm a 894 nm. Na tyto vlnové délky připadá 80 až 90% vyzářeného zářivého toku. Pro snížení zápalného napětí je cesiová výbojka plněna argonem. Tlak par cesia je za provozu kolem 250 Pa. Tepelná izolace výbojky je zajištěna uzavřením v ochranné baňce s vysokým vakuem. Na elektrody je nanášena emisivní látka, která má za úkol zesílit emisi elektronů. Páry cesia napadají některé druhy skla, proto je životnost těchto výbojek nízká. Z tohoto důvodu je vnitřní povrch baňky chráněn zvláštní vrstvou proti vlivu těchto horkých par.

### **Xenonové výbojky**

V xenonových výbojkách se výboj tvoří v plynu xenonu. Tlak plynu v nich dosahuje řádově  $10^6$  Pa a záření těchto výbojek má spojitě spektrum. Závislost napětí na proudu v xenonu má rostoucí charakter, proto potřebují napájet z transformátoru – pro zapálení v důsledku vysokých tlaků plynu potřebují vyšší napětí. Spektrum záření vyzařované xenonem v blízké IR oblasti (0,8 až 1  $\mu\text{m}$ ) se skládá z několika spektrálních čar na spojitěm základě. Xenonové výbojky jsou dodnes užívány převážně v automobilovém průmyslu – světlomety – jako zdroj viditelného záření. V oblasti IR jsou využívány pro buzení laserů, stejně tak jako výbojky zábleskové, o kterých se již nebudu blíže zmiňovat.

## **3.3 Zdroje luminiscenční – IR LED**

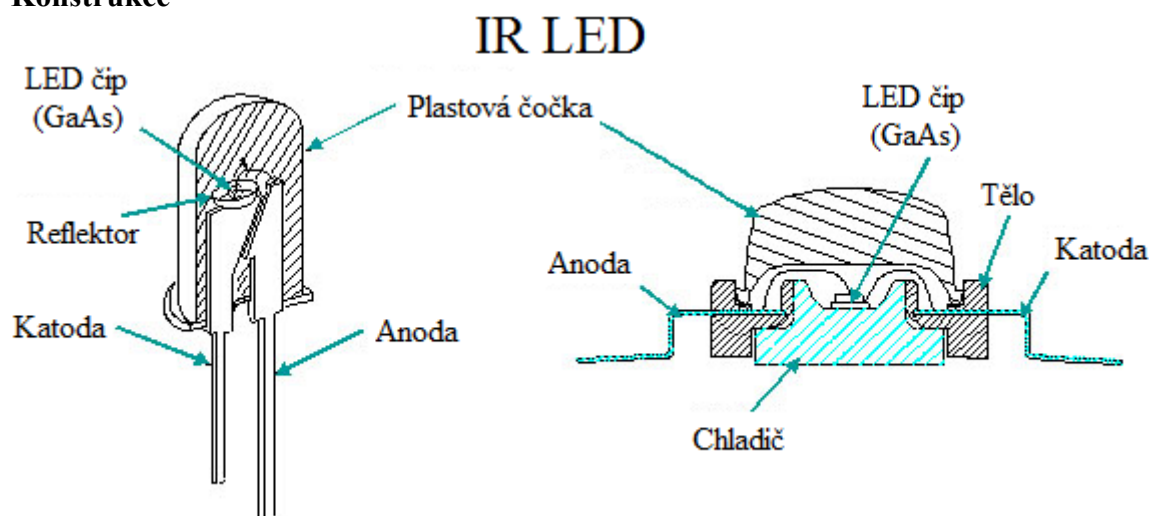
### **Historie**

Vývoj se datuje k roku 1955, kdy Braunstein pozoroval IR emisi vznikající z jednoduchých diodových konstrukcí z prvků GaAs, GaSb, InP a SiGe při pokojové teplotě a při 77 K. V roce 1961 objevili Biard a Pittman blízké IR záření (na vlnové délce 900 nm) emitující z tunelové diody z GaAs. Následující rok si objev nechali patentovat a došlo k prodeji první komerční IR LED diody emitující IR záření na vlnové délce 890 nm. Až do roku 1968 neměly tyto diody praktické využití, poněvadž byly nesmírně drahé - až 200 amerických dolarů za kus. Ceny dnešních IR diod se pohybují v rozmezí jednotek až desítek českých korun za kus.

### **Princip**

IR LED je polovodičová dioda, která při průchodu proudu v propustném směru vyzařuje v IR oblasti spektra. Jestliže diodou prochází proud, dochází na PN přechodu k rekombinaci elektronů a děr. Přitom se uvolňuje energie, která je přibližně rovna šířce zakázaného pásu dané látky (úbytek napětí na IR LED se pohybuje okolo 1,6 V). Tato energie se může vyzářit ve formě fotonu nebo být absorbována v krystalové mříži, což se projeví zvýšenou teplotou polovodiče. Z tohoto důvodu je nezbytné chlazení.

Pravděpodobnost zářivé rekombinace (s fotonem) roste se zvětšující se šířkou zakázaného pásu. U diody z galium-arsenidu (GaAs) se šířkou zakázaného pásu 1.34 eV bude již nezanedbatelná část energie uvolněné při rekombinaci vyzařována ve formě fotonů o příslušné vlnové délce, která však ještě spadá do oblasti neviditelného infračerveného záření. Kombinace tohoto materiálu s fosforem, tzv. galium arsenid fosfid (GaAsP), již při rekombinaci vyzařuje červené viditelné záření. Proto se pro IR LED využívá převážně PN přechod s prvky GaAs.

**Konstrukce****obr. 3.2:** Konstrukční složení IR LED. [14]

Na konci předchozí kapitoly je na obrázku 2.11 znázorněna spektrální citlivost křemíkového článku detektoru pro IR zářič a pro srovnání spektrální citlivosti lidského oka. Jak je patrné, lidské oko na toto záření IR LED citlivé není.

Pomocí IR LED je samozřejmě možno realizovat nejrůznější svítidla, nebo-li zářiče, vyzařující v IR oblasti. Na následujícím obrázku je znázorněn zářič (zleva) pruhový, kruhový a maticový. V praxi se tyto IR zářiče - se spojení s IR kamerou - využívají pro diagnostiku.

**obr. 3.3:** Realizace IR zářičů. [15]**Tab. 3.2:** Obecné parametry zmíněných IR zářičů.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Zářivý tok	jednotky	W
Elektrický příkon	jednotky	W
Účinnost	desítky	%
Napájecí napětí	12-24	V
Proudový odběr	stovky	mA

## 4 Snímače infračerveného záření

Snímači IR záření rozumíme přístroje a zařízení ke zjišťování a měření tohoto záření. Jsou založeny na fyzikálních jevech vznikajících při absorpci záření látkou. Na konci této kapitoly je věnována větší pozornost spektrometrům, respektive Spektrometru JETI Specbos 1211, jež jsem používal při měření v mé praktické části diplomové práce.

### 4.1 Snímače neselektivní (tepelné)

Tepelné snímače jsou v podstatě teploměry. Jejich baňka je opatřena vrstvou látky, tzv. černě. Tato látka dokonale absorbuje dopadající záření a zvýší se tak teplota daného snímače. Uvnitř snímače se tato změna teploty mění na elektrický signál. Ustálené zvyšování teploty vyvolané dopadajícím zářením je pak úměrné dopadajícímu zářivému toku. Zářivý tok, který těmito snímači měříme, je všeobecně velmi malý (řádově  $10^{-9}$  W). Citlivost neselektivních snímačů v uvažovaném rozsahu spektra nezávisí na vlnové délce.

#### 4.1.1 Bolometry

Starší typy kovových bolometrů se skládají ze dvou stejných, velmi tenkých platinových proužků, opatřených na jedné ploše vrstvou černě, které tvoří dvě větve tzv. Wheatstonova můstku. Na jeden z platinových pásků dopadá měřené záření (pracovní článek) a druhý z nich (kompenzační článek) vyrovnává kolísání teploty okolí a další tepelné poruchy. V tomto případě bolometr představuje tepelný snímač, kterým prochází proud. Proud teče z napájecího zdroje můstku, přičemž změna elektrického odporu můstku způsobí výchylku galvanometru (indikátoru nuly), protože původně byl můstek vyvážený. Tento typ bolometru, respektive stejnosměrný bolometr nahradil později bolometr střídavý. Jejich střídavý signál (záření) je zesilován elektronkovými zesilovači a zapisován zapisovacími přístroji. Střídavé bolometry se skládají často pouze z jednoho proužku zapojeného v sérii s baterií a zatěžovacím odporem. Později byla platina nahrazována niklem a zlatem. Bolometry se dále rozdělují na polovodičové a supravodivé, o nichž se blíže zmiňovat nebudu.

#### 4.1.2 Termoelektrické články

Termoelektrické články byly ve své době nástupci bolometrů. Tyto články pracují se stálým zářením, proto je budeme dále nazývat termočlánky stejnosměrnými, obdobně jako u bolometrů.

Podstatou termoelektrického jevu je přímá přeměna tepelné energie (záření) v energii elektrickou a naopak. Termoelektrický článek převádí teplotní změnu prostředí na změnu elektrického napětí

Termoelektrický článek k měření záření se skládají ze svařeného spoje dvou různých kovů, jež je ohříván dopadajícím zářením v tepelném dotyku. Jedná se o tzv. horký spoj. Druhým styčným místem je tzv. studený spoj. Tento spoj je před zářením chráněn a má teplotu místnosti, čímž v obvodu termoelektrického článku vznikne elektrické napětí, které je možné měřit na studeném spoji tohoto článku. Elektrické napětí je úměrné rozdílu teplot obou spojů, jež popisuje Seebeckův jev. Je důležité, aby byl studený spoj udržován na konstantní teplotě, což zaručuje kompenzační a spojovací vedení. V dnešní době existuje škála různých typů, označených například: T, J, E, K, N, S, R, B, L, U atd.

Jednotlivé typy se liší různým složením materiálu termočlánku (Pt, Cu, Ni, Cr...) a dále teplotním rozsahem.

#### 4.1.3 Dielektrický a pyroelektrický snímač

Činnost těchto snímačů zářivé energie je založena na změně dielektrické permitivity kondenzátoru, ve kterém jedna vrstva dielektrika představuje vrstvu pohlcující záření. V **dielektrickém snímači** se při pohlcení záření a zvýšení teploty dielektrika mění kapacita kondenzátoru. Tato změna se zaznamenává jako změna úbytku napětí na zatěžovacím odporu.

**Pyroelektrický snímač** je založen na stejném principu, avšak jako dielektrikum kondenzátoru se využívá materiálu s pizelektrickými vlastnostmi. Polarizaci některých krystalů je možno vyvolat pružnou deformací. Tyto deformace vznikají při ohřátí kondenzátoru zářením. Pyroelektrický snímač pracuje bez použití vnějšího napájecího zdroje. Rozdíl potenciálů, které vzniká mezi vrstvami dielektrika kondenzátoru, se zesiluje a zaznamenává měřicími přístroji. Tyto výše uvedené snímače byly používány především pro laboratorní účely.

## 4.2 Snímače selektivní (fotoelektrické)

Fotoelektrické snímače IR záření můžeme rozdělit na dvě skupiny, a to na:

- a) Snímače s citlivostí v blízké a střední IR oblasti
  - Plynem plněné fotonky, fotodiody, spektrometry
- b) Snímače s citlivostí ve vzdálené IR oblasti
  - Chlazené odporové fotonky, fotogalvanomagnetický snímač

### 4.2.1 Fotodiody

Jedná se o PN přechod sériově zapojený v obvodě, který se skládá ze zdroje hradlového napětí a odporu zátěže. Pokud na snímač nedopadá záření, obvodem protéká proud za tmy (proud v nepropustném směru, vyvolaný tepelnou difúzí vedlejších nosičů proudu). Při ozáření diody pohlcením energie ve formě fotonů se uvádějí do pohybu elektrony a díry. Když tyto nosiče náboje vznikají ve vzdálenosti od PN přechodu, která je menší než difúzní vzdálenost, potom se objeví před přechodem dříve, než se uskuteční proces rekombinace. Při přechodu se elektrony a díry rozdělí, přičemž vedlejší se unesou polem průchodu a hlavní nosiče, které zůstali při přechodu, vytvoří objemový náboj, který pole unáší v opačném směru. Mezi nejpoužívanější materiál pro výrobu fotodiody se řadí germanium.

### 4.2.2 Fotonky

Struktura fotonek je složitá a závisí ve značné míře na konkrétním technologickém postupu její přípravy. Fotonka je složena z citlivé fotokatody, jež je nanesena na vnitřní stranu skleněné baňky a z anody, která tvoří drátovou smyčku kruhového tvaru, kovovou síťku atd. Mezi anodu a fotokatodu se připojuje napájecí napětí 230 V. Nevýhodou fotonek je postupné klesání jejich citlivosti způsobené únavou při provozu. Tato únava vnika nejen při ozařování viditelným světlem, ale také IR zářením. Nejznámější a ve své době nejpoužívanější byla fotonka stříbro-cesiová.

### 4.2.3 Spektrometry

Spektrometr je monochromátor (rozkládá záření zdroje a z vytvořeného spojitého spektra propouští štěrbinou pouze monochromatické záření, jehož vlnovou délku lze měnit polohou štěrbin vůči vytvořenému spektru) se zdrojem a přijímačem záření, zesilovačem signálu, příslušným měřicím přístrojem a dalšími prvky sestavenými v konstrukční jednotku.

Z principiálního hlediska se dělí IR spektrometry na jednopaprskové a dvoupaprskové.

Jednopaprskové spektrometry představují nejjednodušší možnou sestavu základní prvků. V podstatě se jedná o princip rozkladu světla na mřížce nebo hranolu. Záření ze zdroje je modulováno rotujícím kotoučem s otvory a prochází měřeným vzorkem. Po průchodu monochromátorem dopadá monochromatické záření na přijímač záření, jehož střídavý signál je zesilován rezonančním zesilovačem a po usměrnění je měřen měřicím, případně zapisovacím přístrojem. Měření spektrální charakteristiky vzorku je u tohoto jednopaprskového spektrometru velmi zdlouhavé. S velkým rozvojem IR spektroskopie byl vyvinut spektrometr dvoupaprskový, který umožňuje zapisovat automaticky spektrální křivku vzorku jako funkci vlnové délky. Tyto přístroje jsou rovněž vybaveny clonou s „optickou nulou“ před vstupní štěrbinou monochromátoru. Proto se tyto spektrometry nazývají rovněž spektrofotometry.

#### Spektrometr JETI Specbos 12X1

Spektrometr JETI se používá k měření spektra optického záření. Spektrometr může měřit spektrální složení dopadajícího záření, jas, osvětlenost, trichromatické souřadnice x, y, z, u, v, náhradní teplotu chromatičnosti, dominantní vlnovou délku, index podání barev a kolorimetrickou čistotu.

Spektrometry JETI Specbos 12X1 jsou snadno použitelné pro různé aplikace. Jejich malý tvar je vhodný z hlediska použití v laboratorních i průmyslových podmínkách. Prostřednictvím spektrometru můžeme měřit jas a zářivost nebo osvětlenost a ozáření. Dále také kolorimetrické údaje, které se vypočítávají ze změřených spektrálních dat (CCT neboli náhradní teplotu chromatičnosti, kolorimetrickou čistotu, dominantní vlnová délka a CRI neboli index podání barev). Proto jsou tyto přístroje vhodné pro testování světelných zdrojů nebo také pro měření projektorů a osvětlení místností.

Specbos 1201 je spektrometr, který měří jen ve viditelném spektru, tedy v rozsahu vlnových délek od 350 nm do 780 nm.

Specbos 1211 je spektrometr, který pokrývá rozsah vlnových délek od 350 nm až do 1000 nm, používá se tedy nejen pro viditelné spektrum, ale také pro spektra infračerveného záření. Spektrometry řady 1211 jsou asi desetkrát citlivější než spektrometry řady 1201. [16]





*obr. 4.1:* Spektrometr JETI Specbos 1201 a 1211. [22]

### Technické vlastnosti

Spektrometry JETI pracují prostřednictvím 15 bitového A/D převodníku. Při snímání spektra vyzařování zvoleného zdroje je krok pro snímání vlnových délek 1 nm. Rozsah jasu je od  $0,1 \text{ cd/m}^2$  do  $2500 \text{ cd/m}^2$  s přesností  $\pm 2 \%$  na  $100 \text{ cd/m}^2$ , rozsah osvětleností je od 2 lx do 10 klx. Náhradní teplota chromatičnosti je vypočítávána s přesností  $\pm 20 \text{ K}$ .

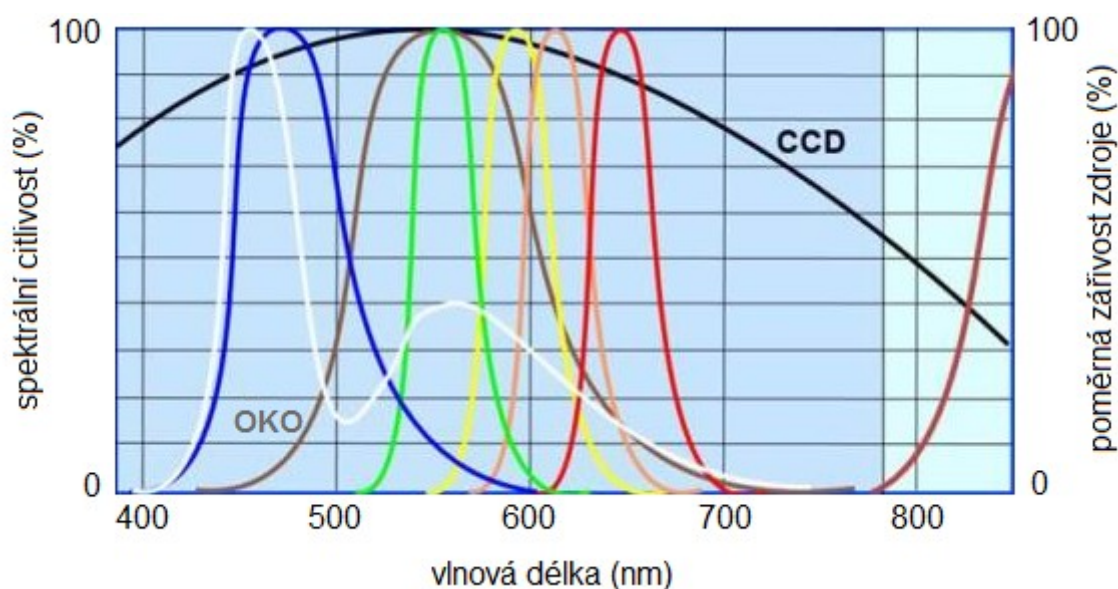
Měření může probíhat ve dvou režimech, a to buď v režimu měření jas / zářivost nebo osvětlenost / ozáření. V případě prvního režimu slouží pro přesné zaměření světelného zdroje laserový paprsek, který přesně vymezí měřící plochu zdroje.

Pro druhý režim měření osvětlenost / ozáření se využívá kosinusového korekčního nástavce, který slouží jako senzor hodnoty osvětlení. I v tomto režimu můžeme nejprve využít laserového zaměření zdroje a poté teprve použít kosinový korektor pro měření. Použitý software automaticky přepne do příslušného režimu měření v závislosti na měření s nebo bez kosinového korektoru. Pro oba režimy kromě níže uvedených měřených a vypočtených veličin je také vypočítáván index podání barev Ra a trichromatické souřadnice.

Snímání a analýza dat se provádí pomocí počítačového softwaru JETI LiMeS. Připojení k PC je přes USB rozhraní. Získaná data pro další zpracování lze exportovat do souborů dalších formátů a jednotlivé grafy lze uložit jako obrázek. [16]

## 5 Spektrální citlivost kamerových systémů

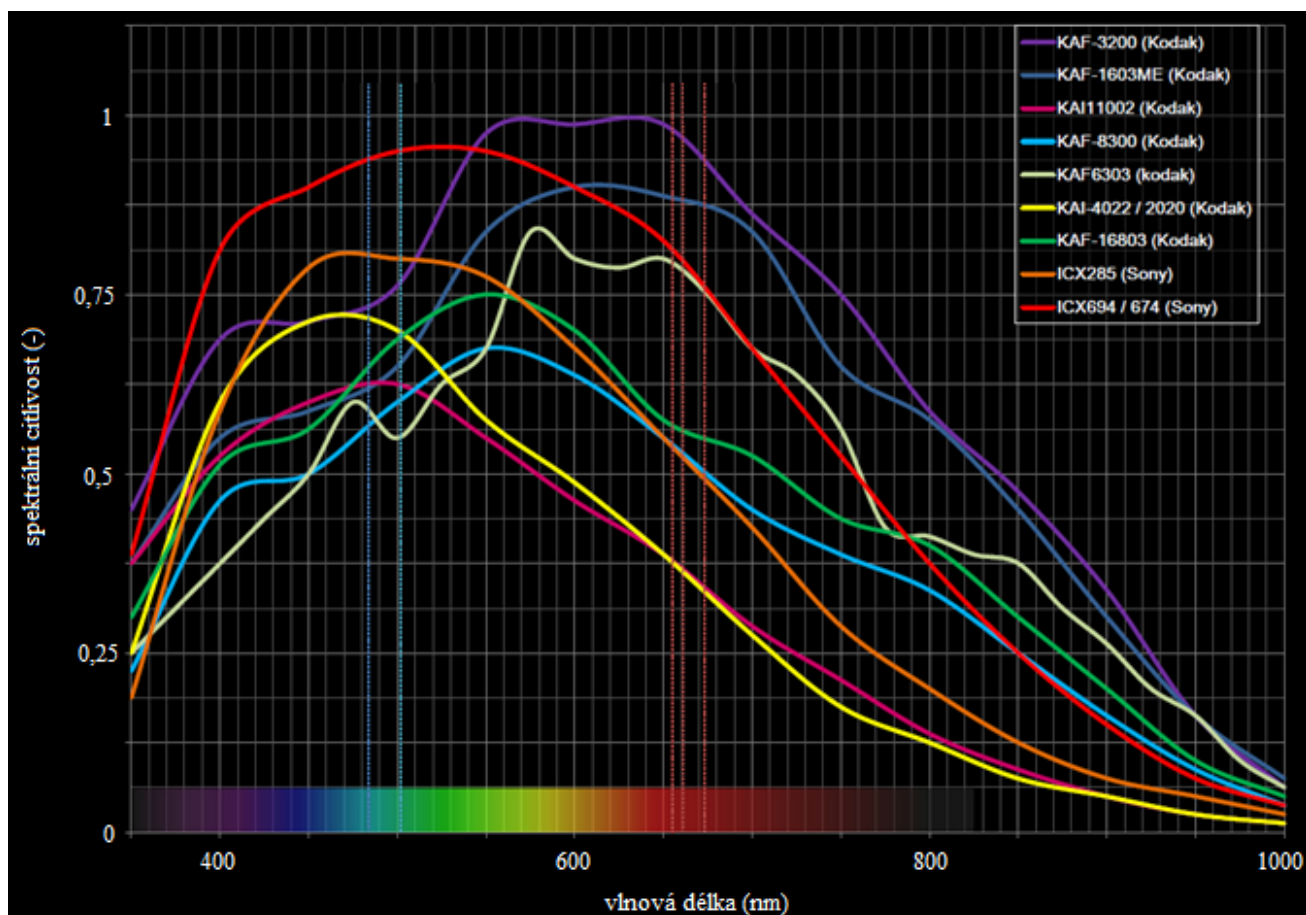
V této kapitole se zaměřuji na spektrální citlivost kamerových systému. Je to velice důležité z hlediska kvality přenosu zaznamenávané události. Existuje široká škála typů (řad) čipů od nejrozličnějších výrobců kamer. Je třeba si uvědomit, že každý čip má vlastní citlivost. Proto je nutné zvolit vhodný čip pro daný IR přísvit. Na základě získaných spektrálních charakteristik čipů kamer a naměřených vyzářovacích charakteristik IR zářičů vypočteme přenos soustavy a nakonec rozhodneme, zda-li je daná kamera (kapitola 7) vhodná pro IR zářič (kapitola 6), či nikoli.



**obr. 5.1:** Spektrální rozsah citlivosti lidského oka a snímače (čip) s různými, barevnými zářiči. [23]

Výše uvedený obrázek znázorňuje rozdíl v rozsahu spektrální citlivosti lidského oka (hnědá barva křivky) a citlivosti čipu kamery - CCD (černá barva křivky). CCD má rozsah i v IR oblasti, což je pro experimentální snímání v IR oblasti nezbytně nutné. Je třeba poznamenat, že křivka CCD je zde idealizovaná. Skutečný tvar křivek spektrální citlivosti čipů je znázorněn na dalším obrázku a rovněž také v rozboru kapitoly 7.

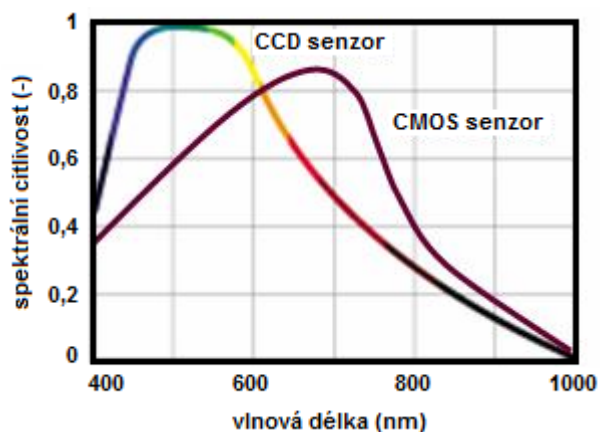
Dále jsou na obrázku 5.1 znázorněny jednotlivé barevné zářiče, na něž je citlivé jak oko, tak čip kamery. V pravé části obrázku je část křivky IR zářiče (tmavě červená barva křivky), na niž je citlivý pouze jen čip. Tato skutečnost je důležitá proto, že kamerový systém má funkci jak ve dne (barevný režim), tak v noci (černobílý režim) – noční vidění. Ke zvýšení kvality přenosu zaznamenávané události za tmy se využívá přísvětlování pomocí IR zářičů, jež mají dosah až desítky metrů, v závislosti na počtu těchto IR LED a jejich napájení.



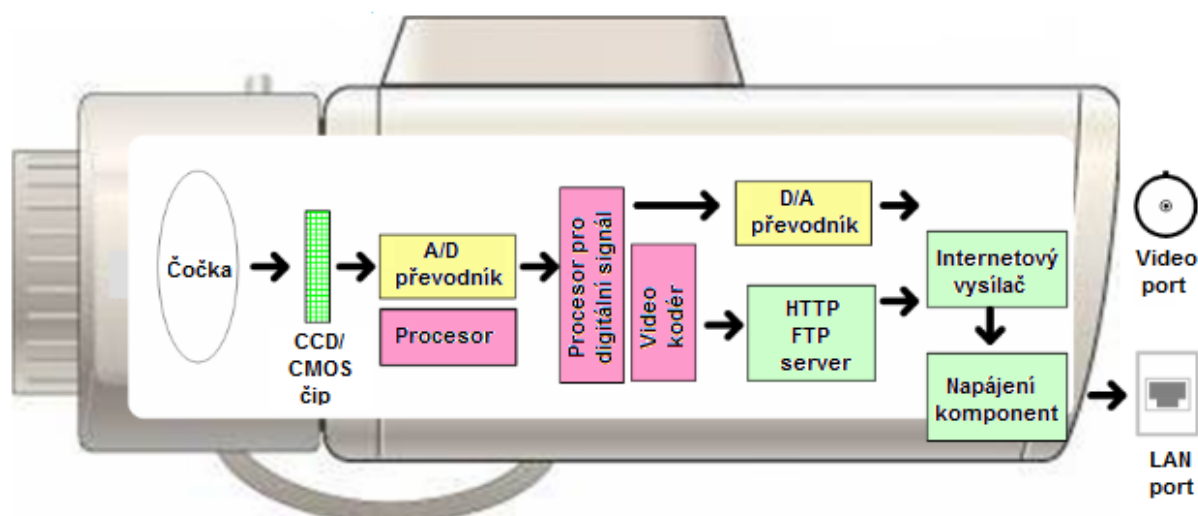
obr. 5.2: Spektrální citlivost čipů kamer Sony a Kodak. [24]

Obrázek 5.2 znázorňuje hned několik spektrálních křivek citlivosti čipů. Je patrné, že každý čip má odlišnou, jedinečnou citlivost a proto je nutné k němu zvolit optimální zdroj záření pro maximální přenos zaznamenávané události jak pro barevný, tak pro černobílý režim snímání.

Mimo CCD snímáče existují i snímáče na bázi CMOS. CMOS jsou obecně citlivější na infračervených vlnových délkách, a proto jsou vhodnější pro kamerové systémy v nočním režimu s IR přísvitem.



obr. 5.3: Rozdíl ve spektrální citlivosti snímáče CCD a CMOS. [25]



**obr. 5.4:** Blokové schéma kamery se CCD, nebo CMOS čipem. [26]

Dnešní moderní kamerové systémy jsou ekonomicky dostupné - co se týká pořizovacích a provozních nákladů, a proto není výjimkou, že se stávají stále častěji doplňky zabezpečovací techniky rodinných domů, nikoli jen kulturních, průmyslových objektů a obchodních domů, jak tomu bylo dříve.

Na obrázku 5.4 je zobrazeno blokové uspořádání jednotlivých prvků kamery, zpracovávající zaznamenávanou událost. Pro tuto práci je nejdůležitější právě čip kamery (CCD/CMOS), nacházející se přímo za čočkou objektivu kamery. Dnes je nezbytnou součástí přenos videosignálu nejen pomocí LAN kabelu, ale také pomocí Wi-Fi.

## 6 Měření zářivých parametrů infrazářičů

V této kapitole je popsáno vlastní měření infrazářičů se sestrojenými charakteristikami. Konkrétně se jedná o křivky zářivosti a spektrální křivky vyzařování jednotlivých IR LED.

### 6.1 Použité infrazářiče, přístroje a rozbor měření

#### Použité infrazářiče:

- LL-60IR50, LL-120IR50, RL-100IR50, SP-26IR18, MX-50IR

První dvě písmena označují druh (tvar) svítidla. Následující dvojčíslí označuje délku, nebo průměr aktivní plochy svítidla. Označení IR je přiřazeno oblasti IR a poslední dvojčíslí reprezentuje vyzařovací úhel. Více v seznamu použitých zkratk.

#### Použité přístroje:

- **JETI Specbos 1211**

Rozsah osvětleností:	2 lx ÷ 10 klx
Spektrální rozsah:	350 nm ÷ 1000 nm
Rozsah svítivosti:	0,1 cd·m <sup>-2</sup> ÷ 2500 cd·m <sup>-2</sup>
Výrobní číslo:	2010157

#### Přesnosti:

Svítivost	± 2 % na 100 cd·m <sup>-2</sup>
Vlnová délka	± 0,5 nm

- **Spínaný laboratorní zdroj VOLTcraft VSP 2653**

Výstupy:	2x 0,1 až 65 VDC / 0 až 3 A
	1x 0,1 až 6 V/DC / 1,5 A

#### Teoretický rozbor:

Pro popis prostorového rozložení vyzařování zářičů (svítidel) a zářivých (světelných) zdrojů používáme křivky svítivosti. Křivky zářivosti (svítivosti) udávají zářivost (svítivost)  $I$  v různých rovinách vyzařování. Nejčastěji používaná soustava měřicích rovin je C- $\gamma$ , osa rovin je ve středu optické části svítidla.

Pro účely měření považujeme měřený zářič (svítidlo) za bodový zdroj. Toto zjednodušení připouštíme, pokud je fotometrická vzdálenost (vzdálenost čidla měřicího přístroje od zářiče) alespoň 6 - 8x větší, než největší rozměr optické části zářiče (svítidla).

Měření zářivých (světelných) veličin se provádí fyzikálně. Důležitým požadavkem je přesné nastavení světelného středu zdroje do optické osy měřícího zařízení. Při otáčení zdroje musí být světelný střed zdroje ve středu otáčení. V laboratoři je použit systém, který umožňuje otáčení zdroje nebo svítidla kolem světelného středu. Hodnoty zářivosti (svítivosti) naměřené v jednotlivých směrech dané roviny se vynášejí v polárních souřadnicích, což je provedeno u jednotlivých infrazářičů v další podkapitole.

### Postup měření:

Měření se uskutečnilo v laboratořích HARD na VŠB-TU Ostrava katedry elektroenergetiky.

Měření křivek zářivosti proběhlo na fotometrické lavici a bylo provedeno v souladu s normami:

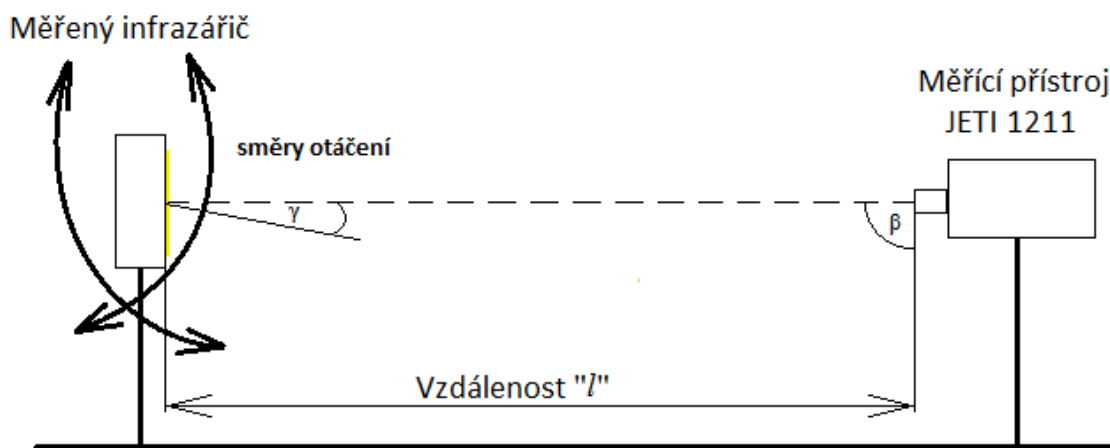
- ČSN EN 62471 – Fotobiologická bezpečnost světelných zdrojů a soustav světelných zdrojů
- ČSN EN 60598 – 1 ed. 5 Svítidla - Část 1: Všeobecné požadavky a zkoušky.

Měření zářivého toku bylo provedeno na fotometrické lavici v souladu s normou:

- ČSN 36 0013. Neplatná norma není nahrazena.

Napájecí napětí bylo 24 V stejnosměrných. Veškerá měření byla provedena po ustálení světelných a tepelných parametrů zdrojů.

Následující obrázek platí jak pro měření zářivých, tak pro měření světelných veličin.



**Obr. 6.1:** Schematické znázornění měření.

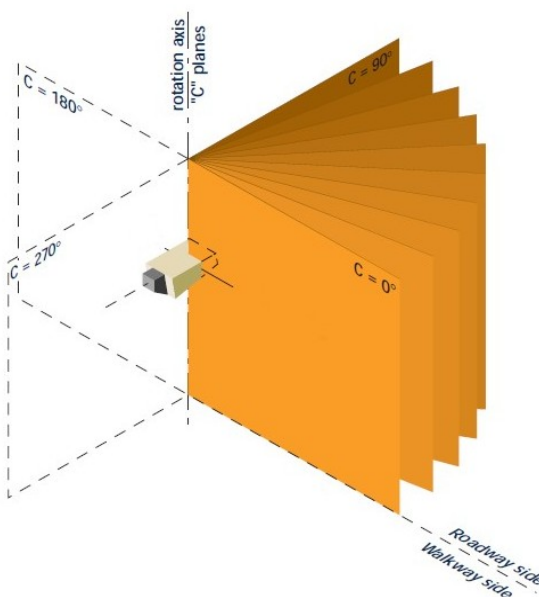
Na obrázku 6.1 je schematicky znázorněno měření křivek zářivosti a měření spektra vyzařování infrazářičů – bez kosinova nástavce na spektrometru JETI - pro měření zářivých veličin.

Z obrázku je patrné, že velikost ozáření  $E_e$  (osvětlenosti  $E$ ) klesá s rostoucí vzdáleností  $l$  infrazářiče (světelného zdroje) od měřicího přístroje, přesněji klesá se čtvercem vzdálenosti – čtvercový zákon.

Ozáření (osvětlenost) je zároveň přímo úměrná hodnotě kosinu úhlu  $\beta$  ( $\cos \beta$  – kosinův zákon – se vzrůstajícím úhlem  $\beta$  klesá ozáření, respektive osvětlenost). Zářivost, respektive svítivost  $I_\gamma$  představuje hodnotu, která je odečtena s úhlem  $\gamma$ . Maximální ozáření (osvětlenosti) tedy dosáhneme v případě, kdy bude normála roviny svírat s dopadajícím paprskem nulový úhel ( $\beta = 0$ ). Hodnota kosinu pak bude mít maximální hodnotu ( $\cos 0^\circ = 1$ ). Tyto zákonitosti popisuje následující vzorec.

$$E = \frac{I_\gamma \cdot \cos \beta}{l^2} \quad (6.1)$$

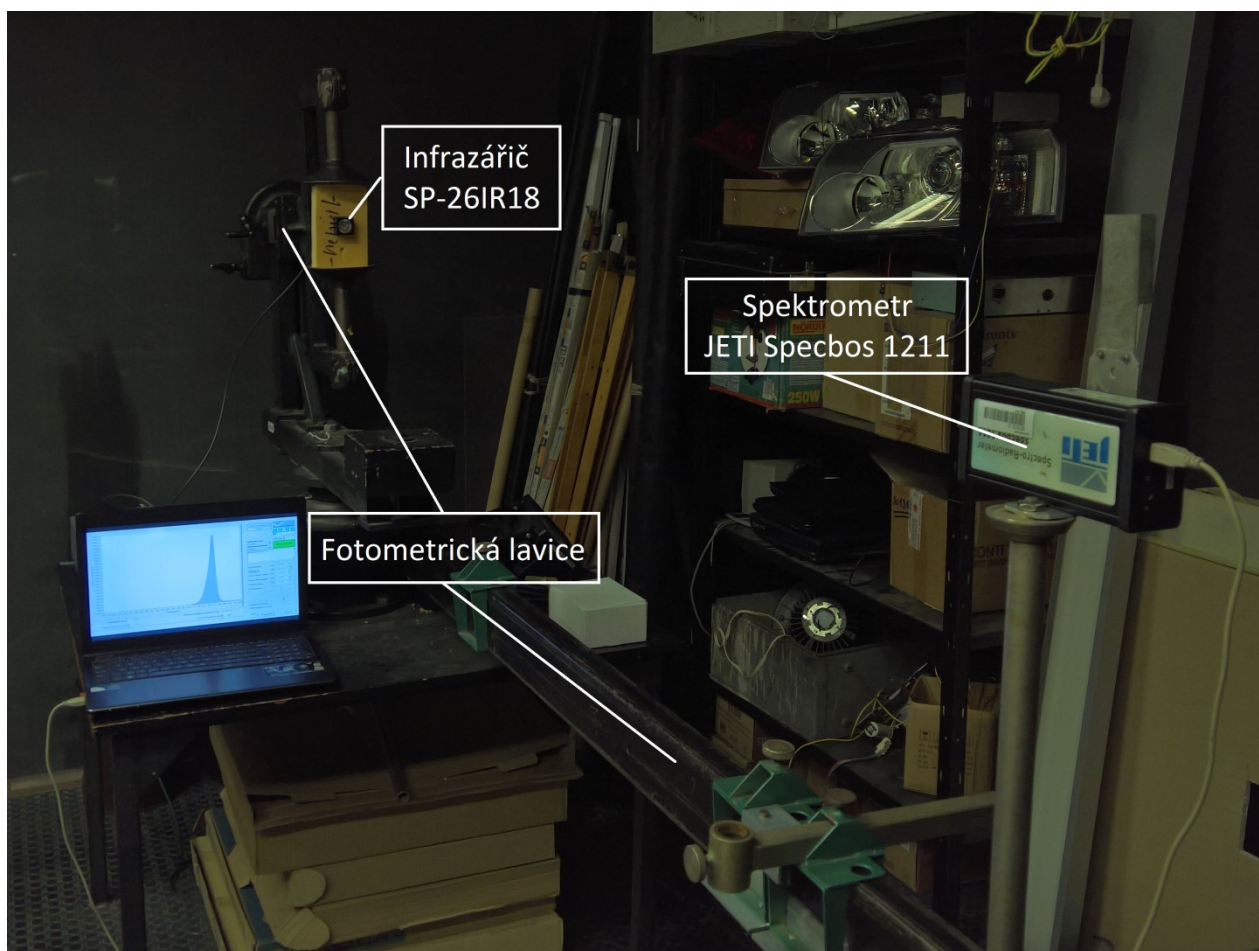
Křivky zářivosti byly změřeny v rovinách C0, C30, C60 a C90 viz obrázek 6.1.1. Pro infrazářiče LL-60IR50, LL-120IR50, RL-100IR50 jsou vypovídající hodnoty zářivosti pro roviny do  $50^\circ$ . Pro SP-26IR18 hodnoty do  $20^\circ$ , dle označení vyzařovacího úhlu v názvu.



**Obr. 6.1.1:** Schematické znázornění měření infrazářičů. [27]

Na obrázku níže je zachycena ukázka z měření. Konkrétně se jednalo o měření spektra vyzařování bodového infrazářiče SP-26IR18 pomocí spektrometru JETI Specbos 1211. Infrazářič je vycentrován na fotometrické lavici. Spektrometr snímá vyzařování a naměřená data posílá přes USB kabel do notebooku.





**Obr. 6.1.2:** Měření spektrálního vyzařování infrazářiče SP-26IR18.

**Příklad výpočtu z tabulky pro infrazářič SP-26IR18:**

Elektrický příkon:  $P = U \cdot I = 24 \cdot 0,15 = 3,6 \text{ W}$

Měrný zářivý výkon:  $\eta = \frac{\Phi_{sv}}{P} \cdot 100 = \frac{1}{3,6} \cdot 100 = 27,8 \%$

Na přiloženém datovém nosiči (CD) jsou originální průběhy spektrálního vyzařování měřených infrazářičů pomocí spektrometru JETI Specbos 1211. Rovněž se zde nacházejí i katalogové listy k jednotlivým infrazářičům, jejichž naměřené a vypočtené parametry jsou rozebrány pod tímto textem.



## 6.2 Infrazářič LL-60IR50

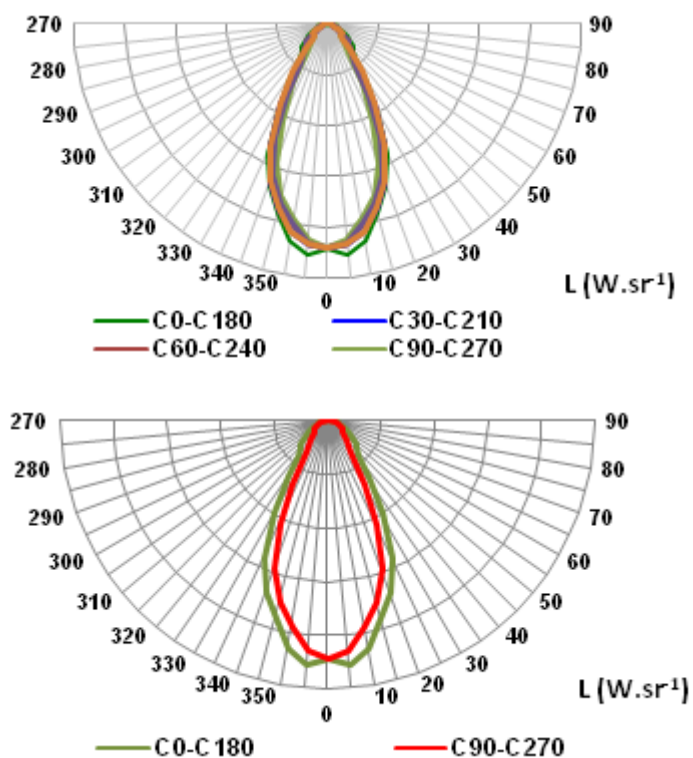


**Obr. 6.2:** Infrazářič LL-60IR50.

**Tab. 6.1:** Naměřené a vypočtené parametry infrazářiče.

LL-60IR50	
Jmenovité napájecí napětí ( $U_n$ )	24 V
Jmenovitý proud ( $I_n$ )	0,076 A
Elektrický příkon ( $P$ )	1,83 W
Zářivý tok ( $\Phi_{sv}$ )	0,6 W
Měrný zářivý výkon ( $\eta$ )	32,5 %

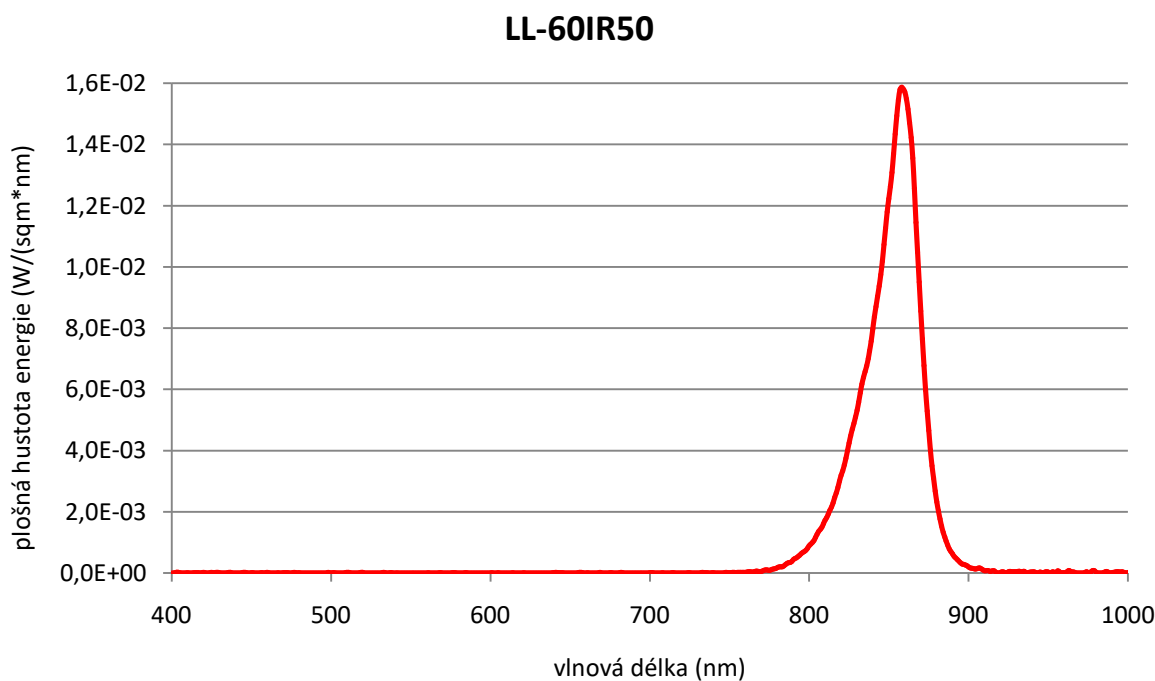
### Křivky zářivosti LL-60IR50



**Obr. 6.3:** Křivky zářivosti zářiče pro jednotlivé úhly vyzařování.

**Tab. 6.2:** Křivky zářivosti – tabelizovaně -  $L$  ( $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ ).

$\gamma$ [°]	C0	C30	C60	C90	C120	C150	C180	C210	C240	C270	C300	C330
0	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000
5	0,6191	0,5936	0,5907	0,5803	0,5907	0,5936	0,6191	0,5936	0,5907	0,5803	0,5907	0,5936
10	0,5857	0,5644	0,5415	0,5267	0,5415	0,5644	0,5857	0,5644	0,5415	0,5267	0,5415	0,5644
15	0,5204	0,5080	0,4998	0,4758	0,4998	0,5080	0,5204	0,5080	0,4998	0,4758	0,4998	0,5080
20	0,4604	0,4495	0,4334	0,3984	0,4334	0,4495	0,4604	0,4495	0,4334	0,3984	0,4334	0,4495
25	0,3857	0,3581	0,3385	0,2877	0,3385	0,3581	0,3857	0,3581	0,3385	0,2877	0,3385	0,3581
30	0,2701	0,2498	0,2207	0,1849	0,2207	0,2498	0,2701	0,2498	0,2207	0,1849	0,2207	0,2498
35	0,1754	0,1599	0,1306	0,0994	0,1306	0,1599	0,1754	0,1599	0,1306	0,0994	0,1306	0,1599
40	0,1168	0,0849	0,0926	0,0691	0,0926	0,0849	0,1168	0,0849	0,0926	0,0691	0,0926	0,0849
45	0,1024	0,0604	0,0810	0,0601	0,0810	0,0604	0,1024	0,0604	0,0810	0,0601	0,0810	0,0604
50	0,0909	0,0479	0,0739	0,0485	0,0739	0,0479	0,0909	0,0479	0,0739	0,0485	0,0739	0,0479
55	0,0753	0,0464	0,0514	0,0453	0,0514	0,0464	0,0753	0,0464	0,0514	0,0453	0,0514	0,0464
60	0,0601	0,0360	0,0267	0,0414	0,0267	0,0360	0,0601	0,0360	0,0267	0,0414	0,0267	0,0360
65	0,0412	0,0223	0,0158	0,0346	0,0158	0,0223	0,0412	0,0223	0,0158	0,0346	0,0158	0,0223
70	0,0288	0,0131	0,0145	0,0282	0,0145	0,0131	0,0288	0,0131	0,0145	0,0282	0,0145	0,0131
75	0,0245	0,0088	0,0138	0,0234	0,0138	0,0088	0,0245	0,0088	0,0138	0,0234	0,0138	0,0088
80	0,0224	0,0098	0,0128	0,0208	0,0128	0,0098	0,0224	0,0098	0,0128	0,0208	0,0128	0,0098
85	0,0204	0,0075	0,0115	0,0186	0,0117	0,0075	0,0204	0,0075	0,0115	0,0186	0,0117	0,0075
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Obr. 6.4:** Plošná hustota energie v závislosti na vlnové délce.  
Maximum ozáření na  $\lambda = 860$  nm.

### 6.3 Infrazářič LL-120IR50

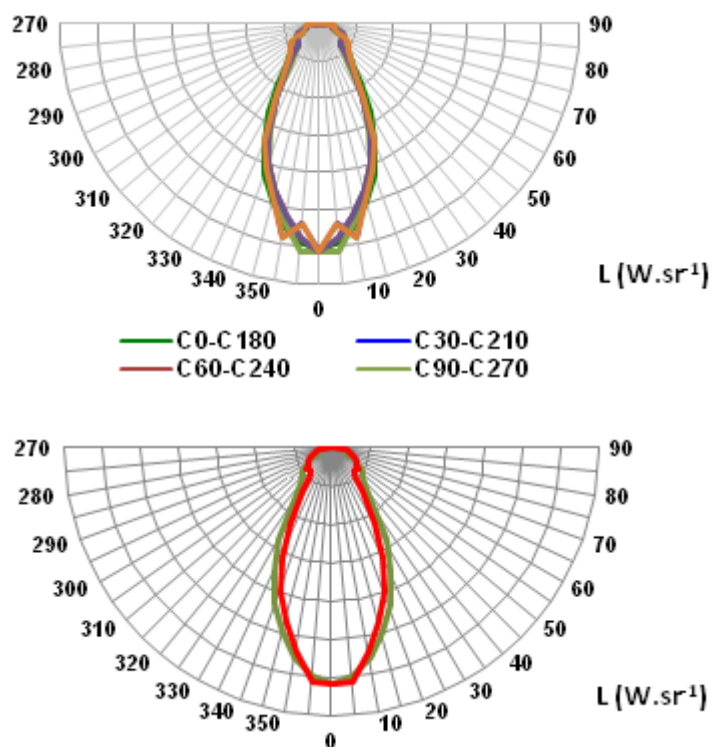


**Obr. 6.5:** Infrazářič LL-120IR50.

**Tab. 6.3:** Naměřené a vypočtené parametry infrazářiče.

LL-120IR50	
Jmenovité napájecí napětí ( $U_n$ )	24 V
Jmenovitý proud ( $I_n$ )	0,16 A
Elektrický příkon ( $P$ )	3,84 W
Zářivý tok ( $\Phi_{sv}$ )	1 W
Měrný zářivý výkon ( $\eta$ )	26 %

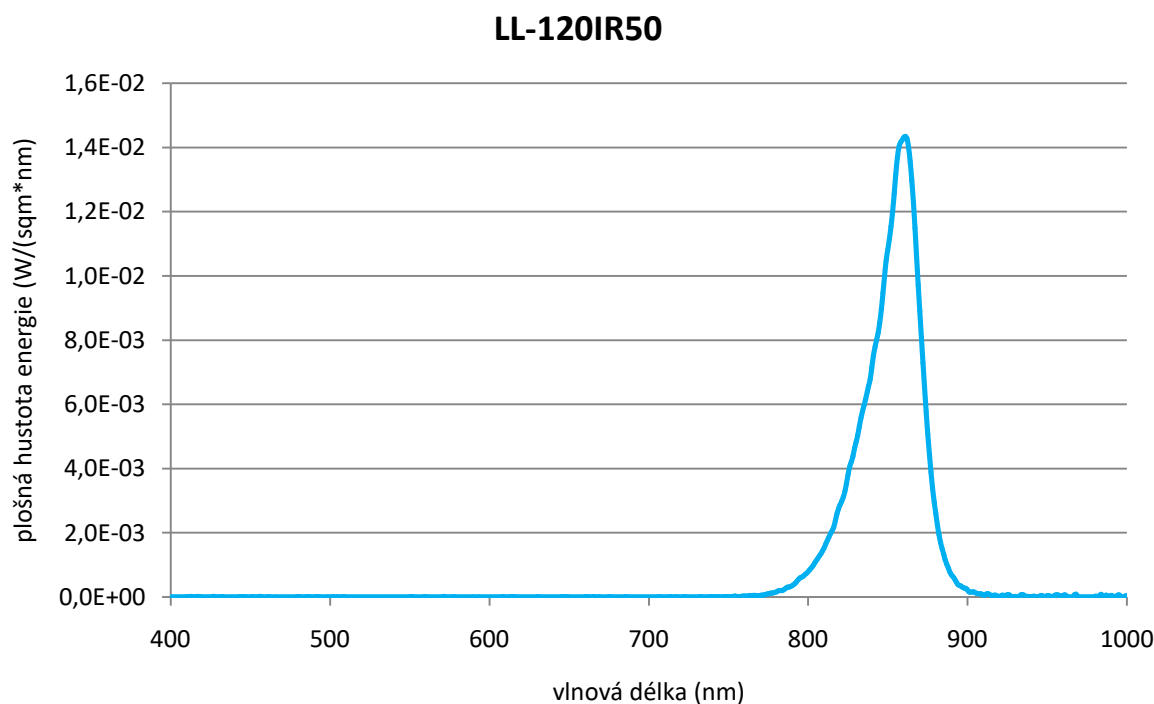
### Křivky zářivosti LL-120IR50



**Obr. 6.6:** Křivky zářivosti zářiče pro jednotlivé úhly vyzařování.

**Tab. 6.4:** Křivky zářivosti – tabelizovaně -  $L$  ( $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ ).

$\gamma [^\circ]$	C0	C30	C60	C90	C120	C150	C180	C210	C240	C270	C300	C330
0	0,5782	0,5782	0,5782	0,5782	0,5782	0,5782	0,5782	0,5782	0,5782	0,5782	0,5782	0,5782
5	0,5600	0,5102	0,5442	0,5779	0,5442	0,5102	0,5600	0,5102	0,5442	0,5779	0,5442	0,5102
10	0,5242	0,5528	0,4920	0,5075	0,4920	0,5528	0,5242	0,5528	0,4920	0,5075	0,4920	0,5528
15	0,4655	0,4534	0,4368	0,4421	0,4368	0,4534	0,4655	0,4534	0,4368	0,4421	0,4368	0,4534
20	0,4084	0,3946	0,3761	0,3772	0,3761	0,3946	0,4084	0,3946	0,3761	0,3772	0,3761	0,3946
25	0,3362	0,3296	0,3074	0,2970	0,3074	0,3296	0,3362	0,3296	0,3074	0,2970	0,3074	0,3296
30	0,2602	0,2313	0,2184	0,2130	0,2184	0,2313	0,2602	0,2313	0,2184	0,2130	0,2184	0,2313
35	0,1830	0,1670	0,1426	0,1296	0,1426	0,1670	0,1830	0,1670	0,1426	0,1296	0,1426	0,1670
40	0,1322	0,1183	0,0959	0,0885	0,0959	0,1183	0,1322	0,1183	0,0959	0,0885	0,0959	0,1183
45	0,1046	0,1030	0,0768	0,0762	0,0768	0,1030	0,1046	0,1030	0,0768	0,0762	0,0768	0,1030
50	0,0936	0,0987	0,0713	0,0872	0,0713	0,0987	0,0936	0,0987	0,0713	0,0872	0,0713	0,0987
55	0,0780	0,0898	0,0751	0,0755	0,0751	0,0898	0,0780	0,0898	0,0751	0,0755	0,0751	0,0898
60	0,0631	0,0705	0,0743	0,0685	0,0743	0,0705	0,0631	0,0705	0,0743	0,0685	0,0743	0,0705
65	0,0449	0,0550	0,0644	0,0627	0,0644	0,0550	0,0449	0,0550	0,0644	0,0627	0,0644	0,0550
70	0,0315	0,0431	0,0474	0,0533	0,0474	0,0431	0,0315	0,0431	0,0474	0,0533	0,0474	0,0431
75	0,0304	0,0388	0,0346	0,0432	0,0346	0,0388	0,0304	0,0388	0,0346	0,0432	0,0346	0,0388
80	0,0308	0,0366	0,0291	0,0338	0,0291	0,0366	0,0308	0,0366	0,0291	0,0338	0,0291	0,0366
85	0,0304	0,0335	0,0301	0,0291	0,0301	0,0335	0,0304	0,0335	0,0301	0,0291	0,0301	0,0335
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Obr. 6.7:** Plošná hustota energie v závislosti na vlnové délce.  
Maximum ozáření na  $\lambda = 861 \text{ nm}$ .

6.4 Infrazářič RL-100IR50

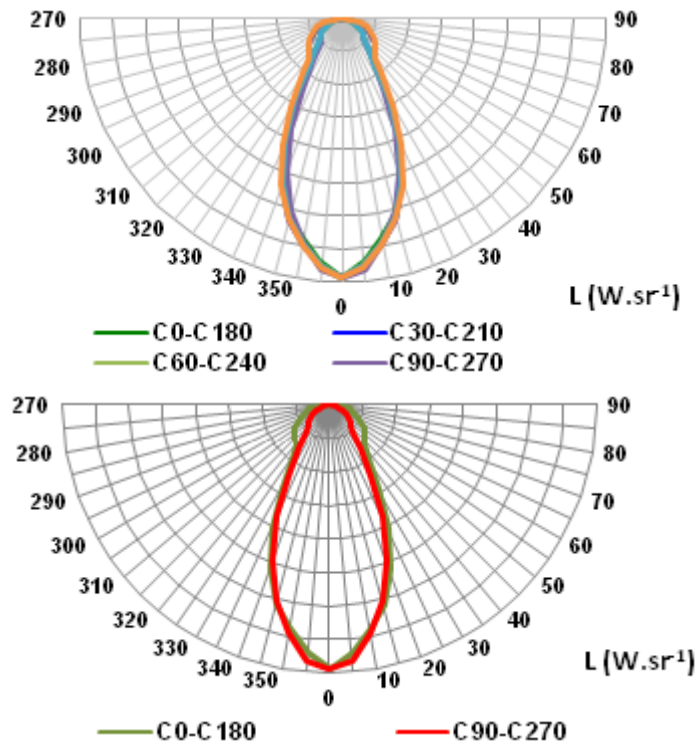


Obr. 6.8: Infrazářič RL-100IR50.

Tab. 6.5: Naměřené a vypočtené parametry infrazářiče.

RL-100IR50	
Jmenovité napájecí napětí ( $U_n$ )	24 V
Jmenovitý proud ( $I_n$ )	0,27 A
Elektrický příkon ( $P$ )	6,48 W
Zářivý tok ( $\Phi_{sv}$ )	2 W
Měrný zářivý výkon ( $\eta$ )	30,8 %

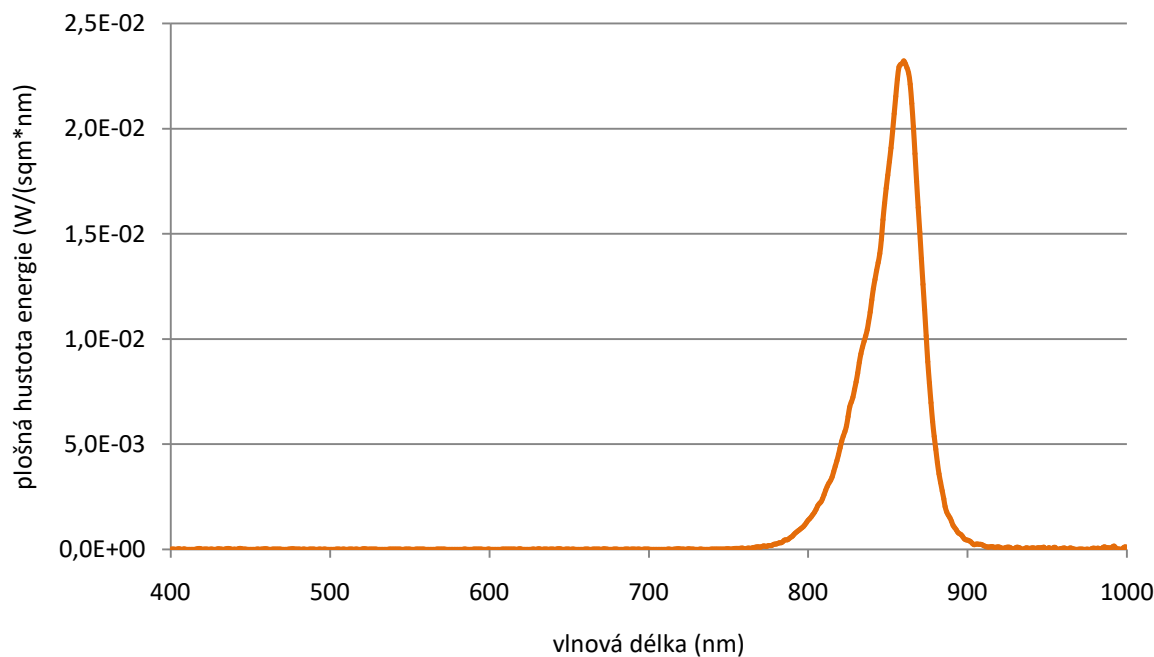
Křivky zářivosti RL-100IR50



Obr. 6.9: Křivky zářivosti zářiče pro jednotlivé úhly vyzařování.

**Tab. 6.6:** Křivky zářivosti – tabelizovaně -  $L$  ( $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ ).

$\gamma$ [°]	C0	C30	C60	C90	C120	C150	C180	C210	C240	C270	C300	C330
0	0,9477	0,9477	0,9477	0,9477	0,9477	0,9477	0,9477	0,9477	0,9477	0,9477	0,9477	0,9477
5	0,8932	0,9166	0,9070	0,9223	0,9070	0,9166	0,8932	0,9166	0,9070	0,9223	0,9070	0,9166
10	0,8175	0,8406	0,8359	0,8302	0,8359	0,8406	0,8175	0,8406	0,8359	0,8302	0,8359	0,8406
15	0,7412	0,7627	0,7527	0,7297	0,7527	0,7627	0,7412	0,7627	0,7527	0,7297	0,7527	0,7627
20	0,6283	0,6520	0,6376	0,5997	0,6376	0,6520	0,6283	0,6520	0,6376	0,5997	0,6376	0,6520
25	0,4887	0,5113	0,4934	0,4475	0,4934	0,5113	0,4887	0,5113	0,4934	0,4475	0,4934	0,5113
30	0,3495	0,3712	0,3433	0,2951	0,3433	0,3712	0,3495	0,3712	0,3433	0,2951	0,3433	0,3712
35	0,2374	0,2461	0,2156	0,1894	0,2156	0,2461	0,2374	0,2461	0,2156	0,1894	0,2156	0,2461
40	0,1887	0,1891	0,1562	0,1332	0,1562	0,1891	0,1887	0,1891	0,1562	0,1332	0,1562	0,1891
45	0,1691	0,1714	0,1230	0,1083	0,1230	0,1714	0,1691	0,1714	0,1230	0,1083	0,1230	0,1714
50	0,1599	0,1609	0,1052	0,1003	0,1052	0,1609	0,1599	0,1609	0,1052	0,1003	0,1052	0,1609
55	0,1452	0,1493	0,0917	0,0860	0,0917	0,1493	0,1452	0,1493	0,0917	0,0860	0,0917	0,1493
60	0,1262	0,1287	0,0729	0,0720	0,0729	0,1287	0,1262	0,1287	0,0729	0,0720	0,0729	0,1287
65	0,1061	0,1087	0,0560	0,0537	0,0560	0,1087	0,1061	0,1087	0,0560	0,0537	0,0560	0,1087
70	0,0848	0,0936	0,0394	0,0383	0,0394	0,0936	0,0848	0,0936	0,0394	0,0383	0,0394	0,0936
75	0,0738	0,0795	0,0275	0,0278	0,0275	0,0795	0,0738	0,0795	0,0275	0,0278	0,0275	0,0795
80	0,0695	0,0715	0,0226	0,0230	0,0226	0,0715	0,0695	0,0715	0,0226	0,0230	0,0226	0,0715
85	0,0654	0,0698	0,0125	0,0212	0,0125	0,0698	0,0654	0,0698	0,0125	0,0212	0,0125	0,0698
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**RL-100IR50****Obr. 6.10:** Plošná hustota energie v závislosti na vlnové délce.Maximum ozáření na  $\lambda = 860 \text{ nm}$ .

6.5 Infrazářič SP-26IR18

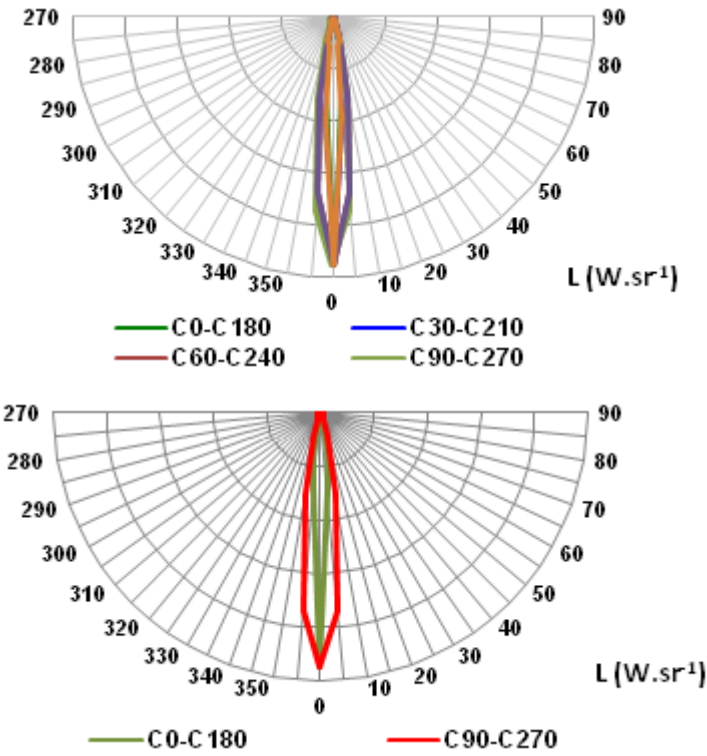


Obr. 6.11: Infrazářič SP-26IR18.

Tab. 6.7: Naměřené a vypočtené parametry infrazářiče.

SP-26IR18	
Jmenovité napájecí napětí ( $U_n$ )	24 V
Jmenovitý proud ( $I_n$ )	0,15 A
Elektrický příkon ( $P$ )	3,6 W
Zářivý tok ( $\Phi_{sv}$ )	1 W
Měrný zářivý výkon ( $\eta$ )	27,8 %

Křivky zářivosti SP-26IR18

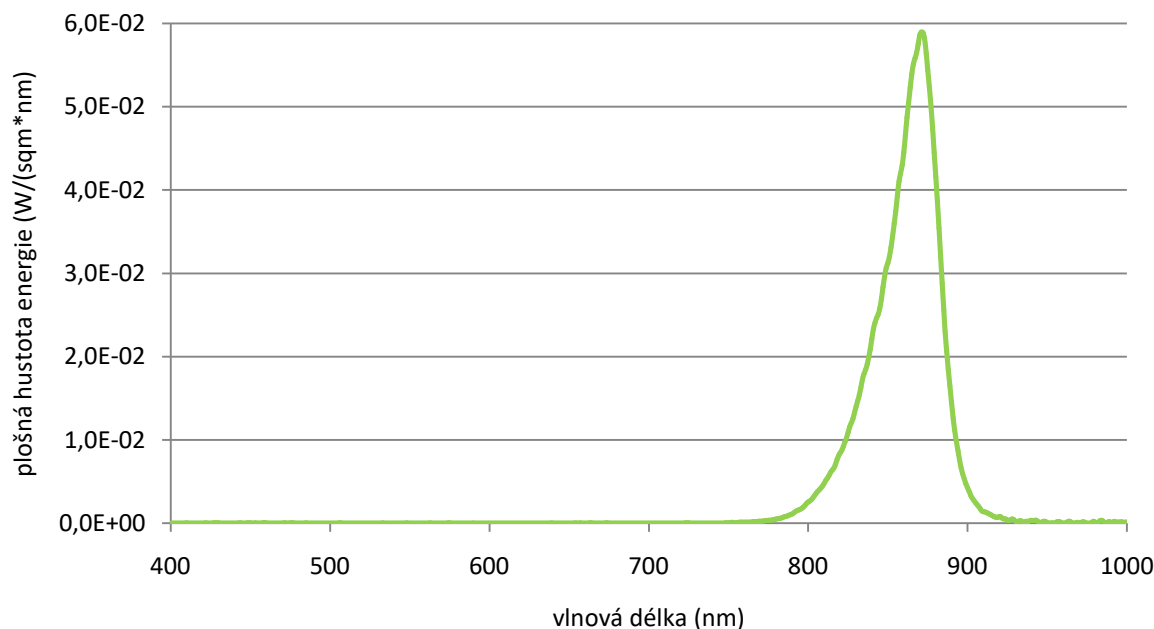


Obr. 6.12: Křivky zářivosti zářiče pro jednotlivé úhly vyzařování.



**Tab. 6.8:** Křivky zářivosti – tabelizovaně -  $L$  ( $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ ).

$\gamma$ [°]	C0	C30	C60	C90	C120	C150	C180	C210	C240	C270	C300	C330
0	6,4380	6,4380	6,4380	6,4380	6,4380	6,4380	6,4380	6,4380	6,4380	6,4380	6,4380	6,4380
5	2,0060	2,5770	4,5880	5,0420	4,5880	2,5770	2,0060	2,5770	4,5880	5,0420	4,5880	2,5770
10	1,0630	0,7482	2,0670	2,1350	2,0670	0,7482	1,0630	0,7482	2,0670	2,1350	2,0670	0,7482
15	0,3231	0,6021	0,5825	0,6140	0,5825	0,6021	0,3231	0,6021	0,5825	0,6140	0,5825	0,6021
20	0,1238	0,1798	0,1880	0,2024	0,1880	0,1798	0,1238	0,1798	0,1880	0,2024	0,1880	0,1798
25	0,0972	0,1192	0,1304	0,1257	0,1304	0,1192	0,0972	0,1192	0,1304	0,1257	0,1304	0,1192
30	0,1091	0,1272	0,1025	0,0936	0,1025	0,1272	0,1091	0,1272	0,1025	0,0936	0,1025	0,1272
35	0,1273	0,1246	0,0760	0,0702	0,0760	0,1246	0,1273	0,1246	0,0760	0,0702	0,0760	0,1246
40	0,1334	0,1028	0,0630	0,0684	0,0630	0,1028	0,1334	0,1028	0,0630	0,0684	0,0630	0,1028
45	0,1162	0,0762	0,0545	0,0940	0,0545	0,0762	0,1162	0,0762	0,0545	0,0940	0,0545	0,0762
50	0,0870	0,0541	0,0457	0,0986	0,0457	0,0541	0,0870	0,0541	0,0457	0,0986	0,0457	0,0541
55	0,0284	0,0300	0,0412	0,0970	0,0412	0,0300	0,0284	0,0300	0,0412	0,0970	0,0412	0,0300
60	0,0170	0,0126	0,0343	0,0894	0,0343	0,0126	0,0170	0,0126	0,0343	0,0894	0,0343	0,0126
65	0,0126	0,0108	0,0301	0,0684	0,0301	0,0108	0,0126	0,0108	0,0301	0,0684	0,0301	0,0108
70	0,0110	0,0095	0,0283	0,0564	0,0283	0,0095	0,0110	0,0095	0,0283	0,0564	0,0283	0,0095
75	0,0117	0,0093	0,0273	0,0525	0,0273	0,0093	0,0117	0,0093	0,0273	0,0525	0,0273	0,0093
80	0,0129	0,0096	0,0279	0,0466	0,0279	0,0096	0,0129	0,0096	0,0279	0,0466	0,0279	0,0096
85	0,0115	0,0094	0,0271	0,0527	0,0271	0,0094	0,0115	0,0094	0,0271	0,0527	0,0271	0,0094
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**SP-26IR18****Obr. 6.13:** Plošná hustota energie v závislosti na vlnové délce.Maximum ozáření na  $\lambda = 871$  nm.



6.6 Infrazářič MX-50IR

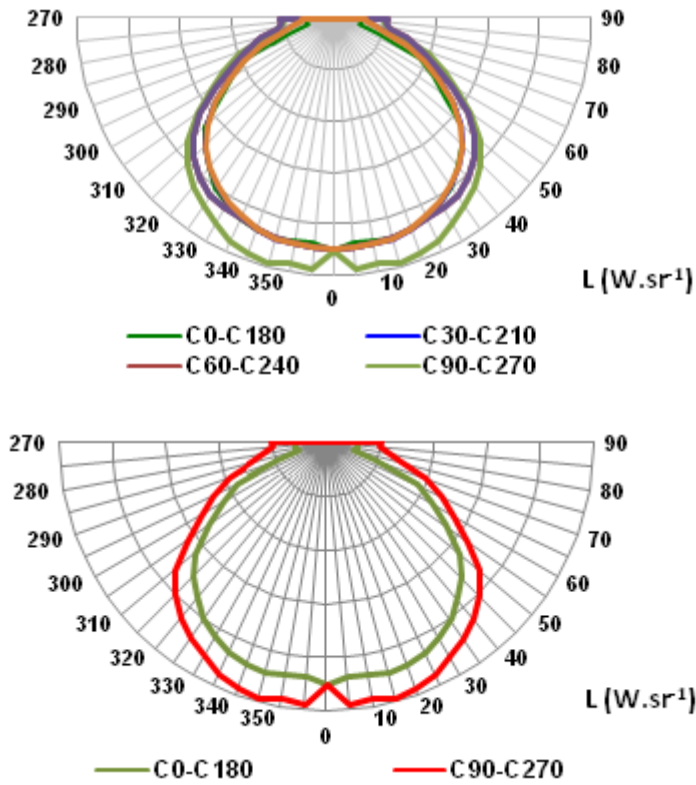


Obr. 6.14: Infrazářič MX-50IR.

Tab. 6.9: Naměřené a vypočtené parametry infrazářiče.

MX-50IR	
Jmenovité napájecí napětí ( $U_n$ )	24 V
Jmenovitý proud ( $I_n$ )	0,19 A
Elektrický příkon ( $P$ )	4,56 W
Zářivý tok ( $\Phi_{sv}$ )	1 W
Měrný zářivý výkon ( $\eta$ )	21,9 %

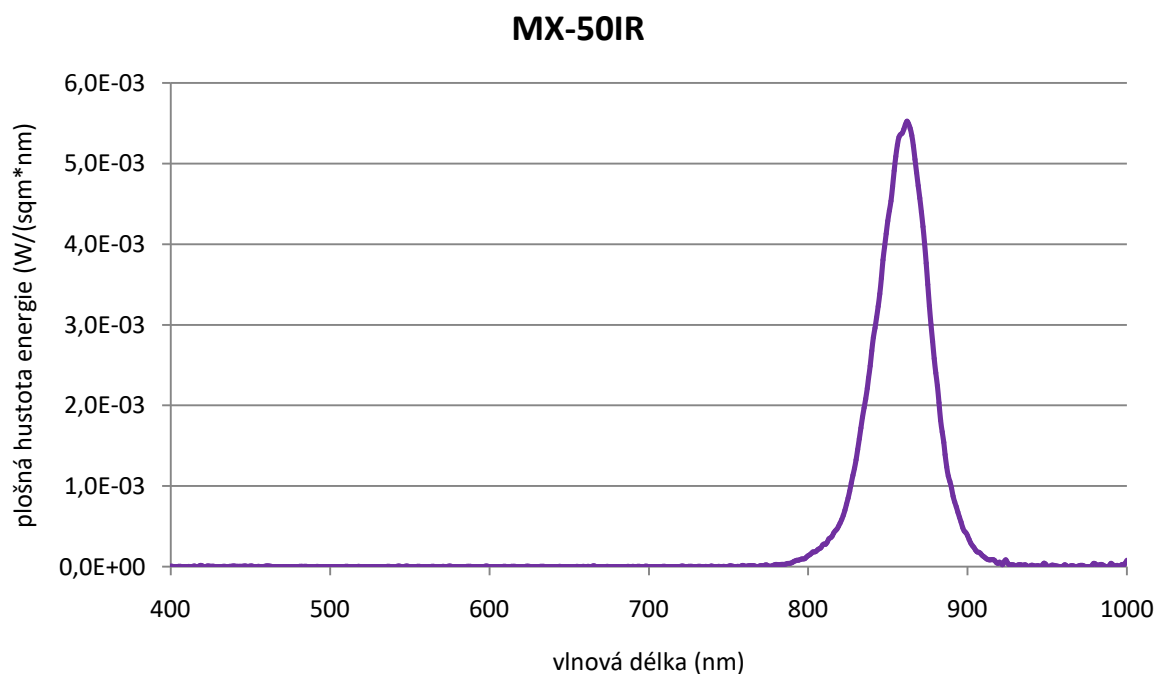
Křivky zářivosti MX-50IR



Obr. 6.15: Křivky zářivosti zářiče pro jednotlivé úhly vyzařování.

**Tab. 6.10:** Křivky zářivosti – tabelizovaně -  $L$  ( $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ ).

$\gamma$ [°]	C0	C30	C60	C90	C120	C150	C180	C210	C240	C270	C300	C330
0	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443	0,2443
5	0,2370	0,2421	0,2430	0,2653	0,2430	0,2421	0,2370	0,2421	0,2430	0,2653	0,2430	0,2421
10	0,2381	0,2421	0,2425	0,2623	0,2425	0,2421	0,2381	0,2421	0,2425	0,2623	0,2425	0,2421
15	0,2405	0,2410	0,2407	0,2666	0,2407	0,2410	0,2405	0,2410	0,2407	0,2666	0,2407	0,2410
20	0,2379	0,2365	0,2370	0,2637	0,2370	0,2365	0,2379	0,2365	0,2370	0,2637	0,2370	0,2365
25	0,2329	0,2304	0,2328	0,2588	0,2328	0,2304	0,2329	0,2304	0,2328	0,2588	0,2328	0,2304
30	0,2261	0,2234	0,2312	0,2496	0,2312	0,2234	0,2261	0,2234	0,2312	0,2496	0,2312	0,2234
35	0,2177	0,2155	0,2271	0,2408	0,2271	0,2155	0,2177	0,2155	0,2271	0,2408	0,2271	0,2155
40	0,2037	0,2042	0,2196	0,2322	0,2196	0,2042	0,2037	0,2042	0,2196	0,2322	0,2196	0,2042
45	0,1915	0,1921	0,2084	0,2182	0,2084	0,1921	0,1915	0,1921	0,2084	0,2182	0,2084	0,1921
50	0,1754	0,1748	0,1927	0,2018	0,1927	0,1748	0,1754	0,1748	0,1927	0,2018	0,1927	0,1748
55	0,1453	0,1536	0,1737	0,1749	0,1737	0,1536	0,1453	0,1536	0,1737	0,1749	0,1737	0,1536
60	0,1211	0,1273	0,1446	0,1486	0,1446	0,1273	0,1211	0,1273	0,1446	0,1486	0,1446	0,1273
65	0,1013	0,1046	0,1190	0,1284	0,1190	0,1046	0,1013	0,1046	0,1190	0,1284	0,1190	0,1046
70	0,0523	0,0805	0,0992	0,1056	0,0992	0,0805	0,0523	0,0805	0,0992	0,1056	0,0992	0,0805
75	0,0275	0,0582	0,0777	0,0776	0,0777	0,0582	0,0275	0,0582	0,0777	0,0776	0,0777	0,0582
80	0,0304	0,0422	0,0602	0,0612	0,0602	0,0422	0,0304	0,0422	0,0602	0,0612	0,0602	0,0422
85	0,0303	0,0334	0,0541	0,0536	0,0541	0,0334	0,0303	0,0334	0,0541	0,0536	0,0541	0,0334
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Obr. 6.16:** Plošná hustota energie v závislosti na vlnové délce.Maximum ozáření na  $\lambda = 862$  nm.

## 7 Porovnání čipů kamer pro optimální snímání

V této kapitole se zaměřuji na změřené infrazářiče z předchozí kapitoly, kterým přiřazuji vybrané čipy kamer a počítám jejich přenos. Snahou bylo získat co nejkvalitnější čip pro snímání v IR oblasti – černobílý režim nočního vidění. První z čipu bude rozebrán podrobněji, u dalších jsem postupoval obdobným způsobem.

### 7.1 Čip Sony ICX274

Tento čip je hojně využíván v průmyslové automatizaci v kamerách pro tzv. strojové vidění - kontrolu polovodičů, kontrolu kvality výroby a nacházejí uplatnění také v kamerách zaznamenávající dopravu. Jedná se o senzor CCD. Jak již bylo zmíněno v kapitole 5, senzor CCD není nejvhodnější volbou pro snímání v IR oblasti, jelikož maximum citlivosti tohoto čipu se nachází ve viditelném spektru (okolo 500 nm), odkud směrem k vyšším vlnovým délkám prudce klesá, jak bude ukázáno na obrázku 7.2.



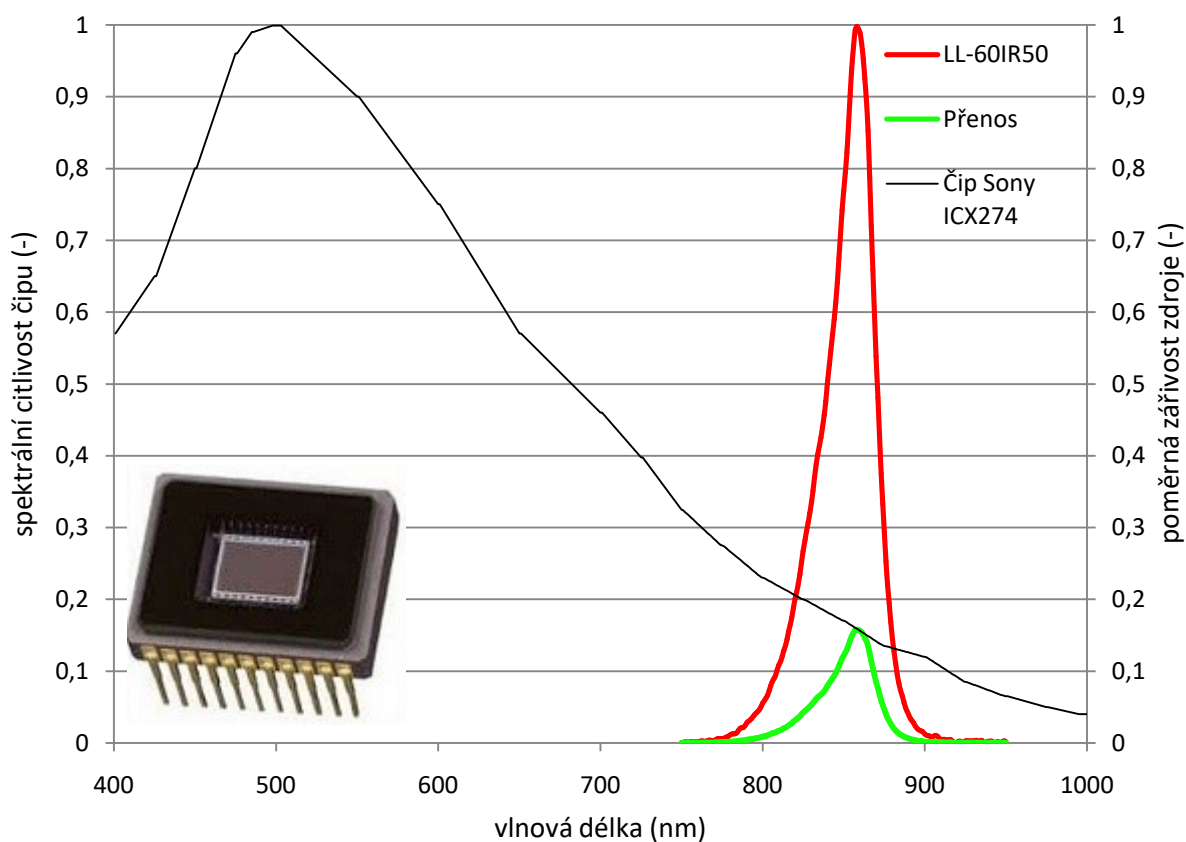
**Obr. 7.1:** Příklady kamer pro strojové vidění firmy COGNEX In-Sight série (zleva) 5000, 8000, 7000.

V programu Microsoft Excel jsem si nejprve nasimuloval křivku spektrální citlivosti daného čipu. Jako vypovídající pro výpočet přenosu jsem volil hodnoty spektrálního vyzařování zářiče v rozmezí vlnových délek 750 až 950 nm. Následně jsem provedl vynásobení křivky spektrálního vyzařování infrazářiče pro každý změřený infrazářič (kapitola 6) s křivkou spektrální citlivosti čipu.

Výsledky vypočtených přenosů jsou zobrazeny v tabulce 7.1. Pro sestrojený graf jsem volil infrazářič s nejvyšší hodnotou přenosu, tedy infrazářič **LL-60IR50**. Ostatní infrazářiče se liší pouze v plošné hustotě energie vyzařování, respektive v hodnotě zářivého toku. Tvary spektrálních charakteristik mají téměř identický. Obdobným způsobem jsem sestrojoval grafy pro další čipy.

**Tab. 7.1:** Vypočtené přenosy pro spektrální vyzařování infrazářičů.

Čip CCD	Infrazářič				
Sony ICX274	LL-60IR50	LL-120IR50	RL-100IR50	SP-26IR18	MX-50IR
Přenos (%)	16,81	16,7	16,68	15,56	15,81



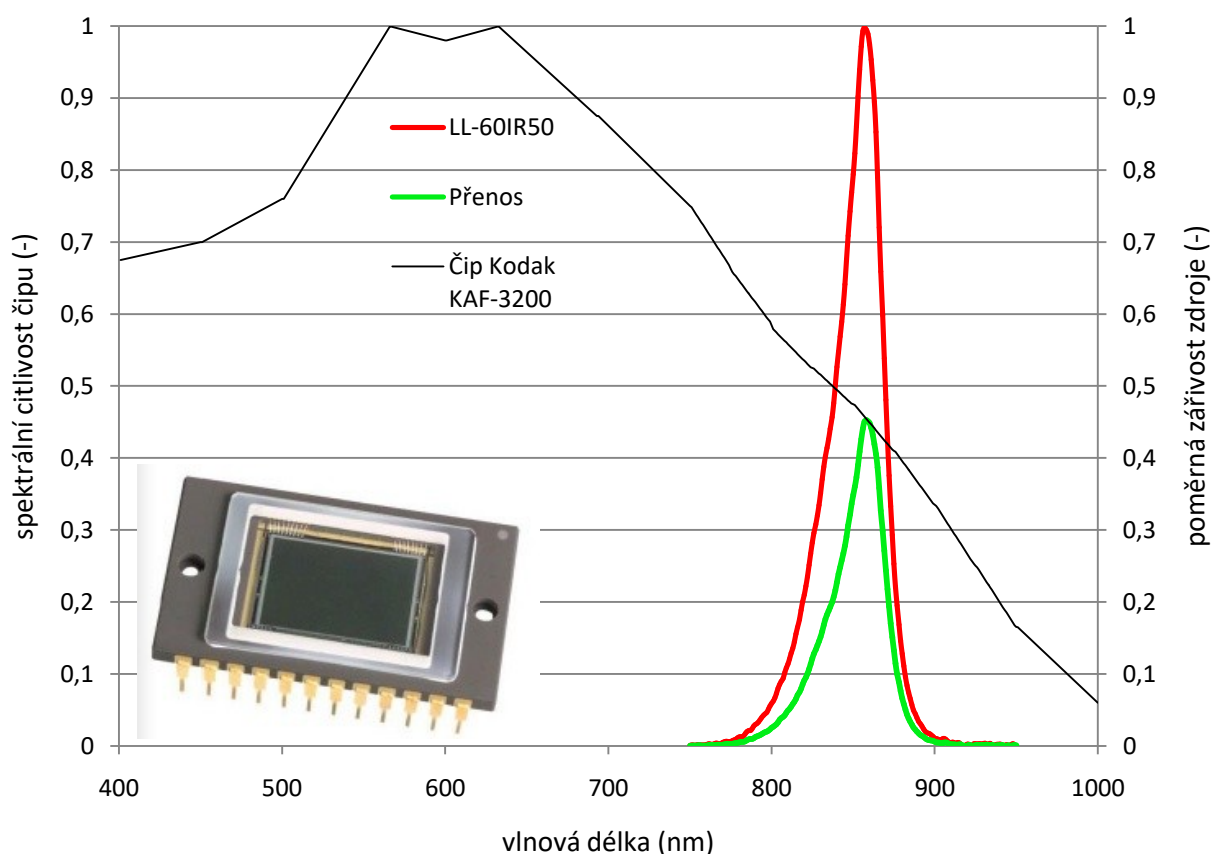
**Obr. 7.2:** Spektrální citlivost čipu společně s monochromatickým vyzařováním infrazářiče v IR oblasti, včetně výsledného přenosu.

## 7.2 Čip Kodak KAF-3200

Tento čip jsem vybral jako kvalitnější z řady snímačů CCD a vhodnější pro oblast IR. Využití nachází převážně při snímání kamerami pro lékařské a vědecké účely. Jak lze vidět na obrázku 7.3, nachází se maximum spektrální citlivosti senzoru na vyšší vlnové délce (565-635 nm), než tomu bylo u čipu od Sony.

**Tab. 7.2:** Vypočtené přenosy pro spektrální vyzařování infrazářičů.

Čip CCD	Infrazářič				
	LL-60IR50	LL-120IR50	RL-100IR50	SP-26IR18	MX-50IR
Kodak KAF-3200					
Přenos (%)	46,91	46,71	46,64	44,28	44,88



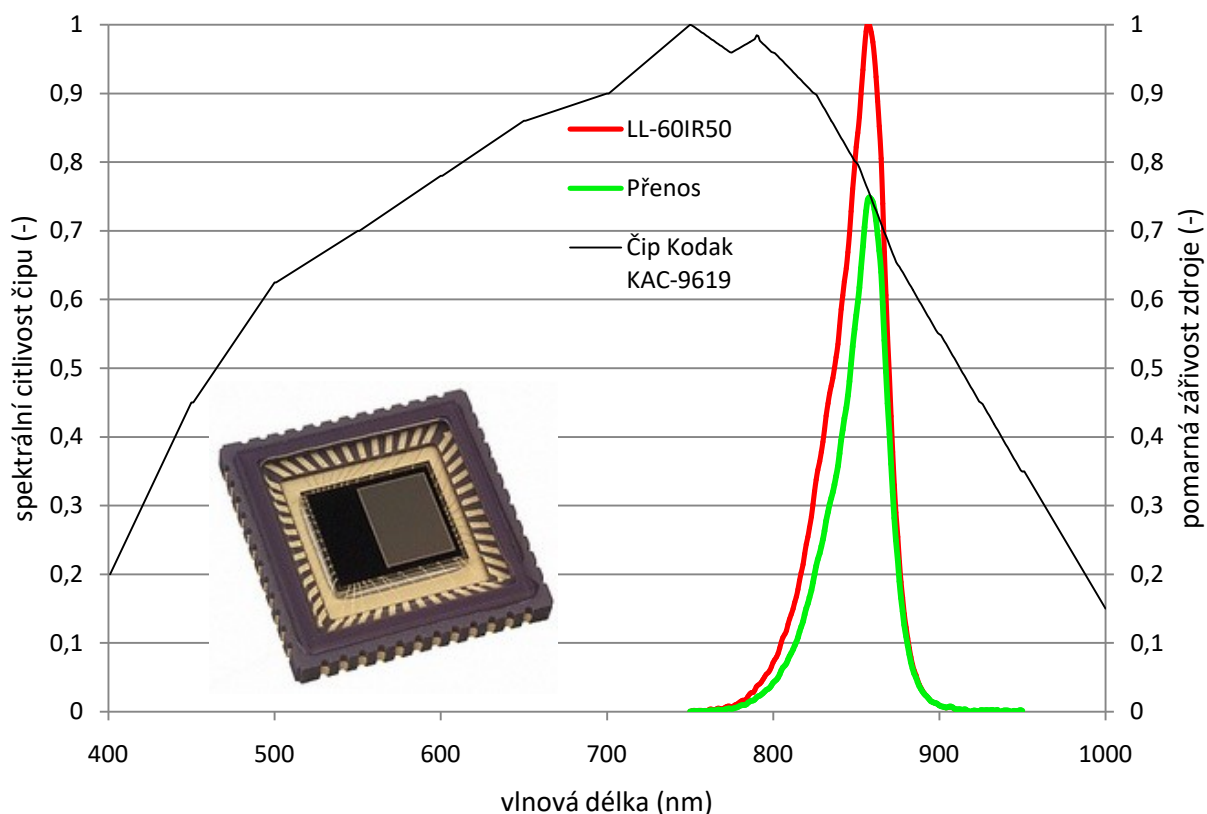
**Obr. 7.3:** Spektrální citlivost čipu společně s monochromatickým vyzařováním infrazářiče v IR oblasti, včetně výsledného přenosu.

### 7.3 Čip Kodak KAC-9619

Tento CMOS čip jsem vybral pro ověření, že jsou vhodnější pro snímání v IR oblasti, než senzory CCD, což prokáže vypočtený přenos. Využití nachází převážně v zabezpečovací technice – noční vidění, strojové vidění, dále v automobilovém průmyslu a také pro čtečky čárových kódů. Jak lze vidět na obrázku 7.4, nachází se maximum spektrální citlivosti čipu na vyšší vlnové délce, než tomu bylo v předchozích případech. Konkrétně v oblasti IR na vlnových délkách mezi 750 – 800 nm.

**Tab. 7.3:** Vypočtené přenosy pro spektrální vyzařování infrazářičů.

Čip CMOS Kodak KAC-9619	Infrazářič				
	LL-60IR50	LL-120IR50	RL-100IR50	SP-26IR18	MX-50IR
Přenos (%)	78,01	77,57	77,45	72,79	74,14



**Obr. 7.4:** Spektrální citlivost čipu společně s monochromatickým vyzařováním infrazářiče v IR oblasti, včetně výsledného přenosu.

## 7.4 Čip Thorlabs DCC1645C

Tento bod diplomové práce jsem zde zařadil jako ukázkou moderního pojetí zabezpečovací techniky. Jedná se o CMOS čip umístěn v kameře firmy EAZZYDV, konkrétně se jedná o model BC-785WM. Tato kamera je umístěna v samotném svítidle viz obrázek 7.5.



**Obr. 7.5:** Skrytá IP kamera v žárovce BC-785YM. [28]

Skrytá IP kamera je umístěná v LED žárovce s bílým světlem (obsahuje 25 LED s 0,2 W příkonu, celkově tedy 5 W) a zároveň i neviditelným IR přísvitem pro noční režim (4 IR LED, 940 nm). Čočka IP kamery není vidět ani při bližším prohlížení díky zrcadlovitému povrchu žárovky.

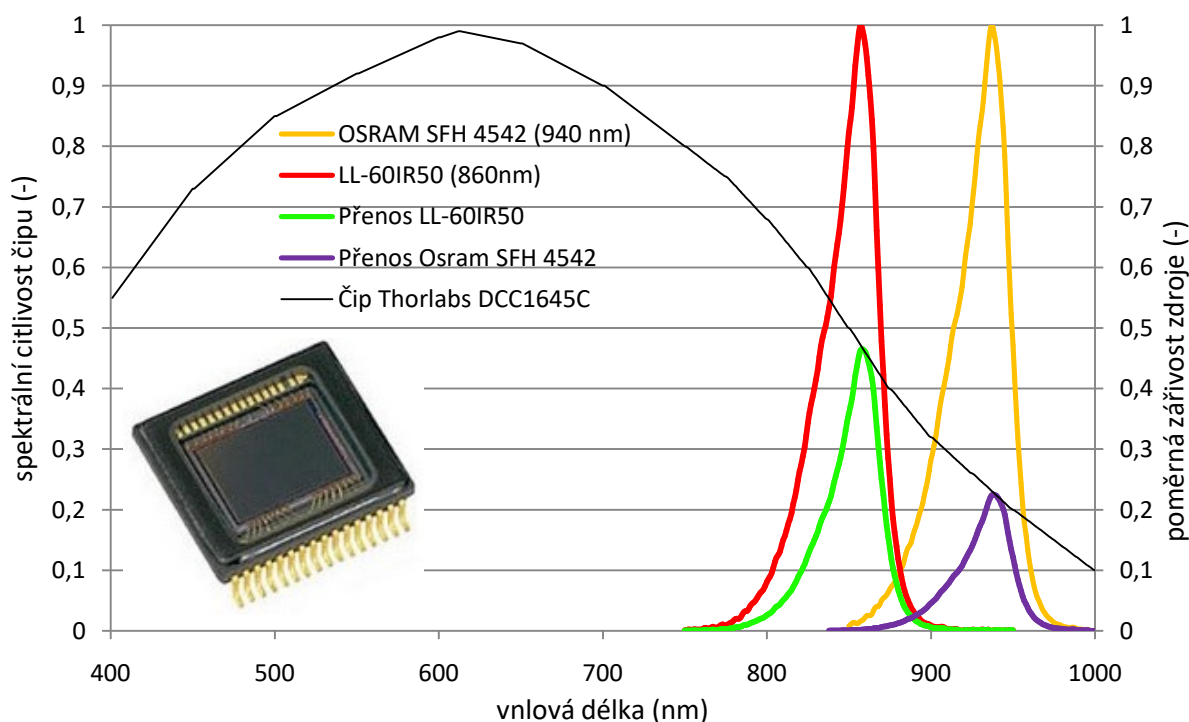
LED přísvit lze vzdáleně zapínat nebo vypínat z mobilního telefonu. Pomocí mobilní aplikace lze nastavit automatické zapínání a vypínání LED světla. Je zde možnost úpravy kamery, aby se světlo spínalo ihned po sepnutí světelného vypínače. Kamera pak ještě více imituje běžnou žárovku.

IP kamera se připojuje do klasického žárovkového závitu E27. Kamera také podporuje SD karty, na kterou lze nahrávat po detekci pohybu, plánovaně nebo nepřetržitě v HD rozlišení 1280x720p, obraz je tedy dostatečně kvalitní. Záznamy lze stahovat do počítače. V počítačové aplikaci lze nastavit nahrávání po detekci pohybu nebo také při zvýšeném hluku. Připojení do počítače a smartphonu funguje pomocí vestavěného Wi-Fi modulu.

Kamera je navržena pro provoz v mobilních aplikacích, přesto existuje počítačová aplikace (Windows, Mac), díky které lze sledovat obraz i z počítače a to vše přes P2P, tedy rychle a bez veřejné IP adresy. V počítačových aplikacích lze nahrávat video i se zvukem. Lze také nastavit maximální velikost úložiště s automatickým přemazáváním.

Kamera je navržena, aby maximálně imitovala běžnou LED žárovku, není ovšem určena k běžnému svícení.

Na základě získané spektrální citlivosti čipu jsem provedl porovnání pro snímání s integrovaným IR přísvitem (940 nm) a infrazářičem LL-60IR50 (860 nm) s nejvyšší hodnotou přenosu pro všechna experimentální měření.



**Obr. 7.6:** Spektrální citlivost čipu společně s monochromatickými zářiči vyzařující na různých vlnových délkách, včetně výsledných přenosů.



**Tab. 7.4:** Vypočtené přenosy pro spektrální vyzařování infrazářičů.

Čip CMOS	Infrazářič	
Thorlabs DCC1645C	LL-60IR50	OSRAM SFH 4542
Přenos (%)	49,74	24,77

Z obrázku 7.6 a tabulky 7.4 je patrné, že vhodnější pro použitý čip, co se přenosu týče, je přísvit s IR LED s vyzařováním na nižších vlnových délkách. Přenos vypočtený pro infrazářič LL-60IR50 je více než dvojnásobný.

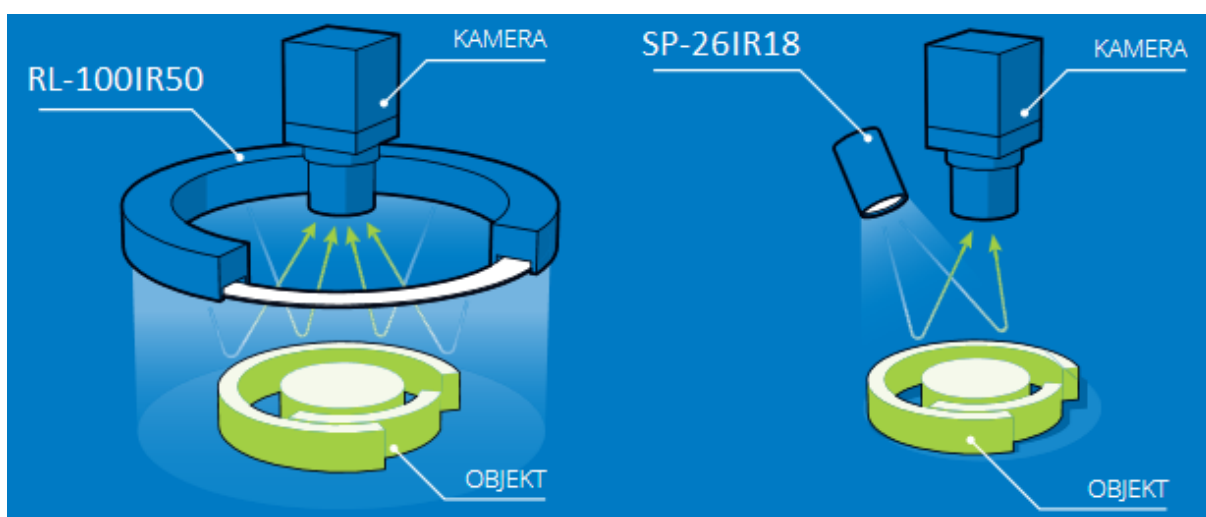
Na přiloženém datovém nosiči (CD) jsou k dispozici katalogové listy CCD a CMOS čipů posuzovaných v této kapitole, konkrétně jejich parametry včetně rozlišení a spektrální citlivosti.



## 8 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a porovnat několik čipů, standardně používaných v dnešních diagnostických kamerách, či CCTV spolupracujících s IR LED přísivitem a na základě přenosu čipů kamery posoudit, zda-li je senzor vhodný pro snímání v IR oblasti spektra.

V první části praktického experimentu bylo měření zářivých parametrů, jimž jsem věnoval celou kapitolu 6. Konkrétně se jednalo o infrazářiče s označením: LL-60IR50, LL-120IR50, RL-100IR50, SP-26IR18 a MX-50IR. Na základě změřených prostorových vyzařovacích charakteristik je možno přiřadit každý z infrazářičů některé z aplikací. Například kruhovým infrazářičem s označením RL-100IR50 je možno „přisvětlovat“ diagnostikovaný předmět, popřípadě najde uplatnění při spolupráci se CCTV, kdy vnitřním průměrem zářiče prochází snímač kamery, který zaznamenává scénu. Dalším příkladem může být infrazářič SP-26IR18, jež je vhodný pro svou úzkou vyzařovací charakteristiku k intenzivnímu přímému nasvícení vzdálenějších objektů, nebo čárových kódů. Oba popisované případy jsou zachyceny na následujícím obrázku.



**Obr. 8.1:** Příklady aplikací IR zářičů. [15]

V následující tabulce jsem provedl porovnání katalogových hodnot infrazářičů s hodnotami naměřenými při jmenovitém napájecím napětí  $U_n = 24$  V. Jedná se konkrétně o hodnoty jmenovitého proudu a příkonu pro každý měřený infrazářič.

**Tab. 8.1:** Porovnání parametrů při jmenovitém napájecím napětí pro měřené infrazářiče.

Porovnáváný parametr	Označení infrazářiče				
	LL-60IR50	LL-120IR50	RL-100IR50	SP-26IR18	MX-50IR
$I_n$ (mA) - katalog	60	150	270	118	190
$I_n$ (mA) - naměřen	76	160	270	150	190
$P$ (W) - katalog	1,5	3,6	6,5	2,8	4,5
$P$ (W) - naměřen	1,83	3,84	6,48	3,6	4,56

Z tabulky je patrné, že naměřené hodnoty se od katalogových hodnot výrobce pro 3 případy liší. Jedná se o vyšší proudový odběr, tedy i vyšší příkon u lineárních zářičů LL-60IR50, LL120-IR50 a bodového zářiče SP-26IR18. Je to způsobeno rozptylem měřených hodnot na daném vzorku a rovněž může být odchylka způsobena chybou měřicího přístroje.

Ve druhé části praktického experimentu jsem porovnával jednotlivé čipy kamer s naměřenými spektrálními charakteristikami infrazářičů pro dosažení optimálního snímání kamerou.

Jako první jsem posuzoval CCD senzor Sony ICX274 hojně využívan v průmyslové automatizaci v kamerách pro tzv. strojové vidění pro kontrolu kvality výroby a také v běžných videokamerách. Jak je na první pohled v rozboru v kapitole 7, z obrázku 7.2 vidět, maximum spektrální citlivosti čipu je velice vzdáleno spektrálnímu vyzařování všech měřených infrazářičů. Proto vyšel výsledný přenos tohoto čipu v rozmezí pouhých 15,56 % až 16,81 %. Na základě přenosu je možno prohlásit, že tento čip není vhodný pro snímání v IR oblasti spektra a je vhodný převážně pro aplikace pracující s viditelným zářením, kde je maximum spektrální citlivosti čipu ( $\lambda = 500$  nm) blízka maximu spektrální citlivosti lidského oka. Na základě tohoto bych volil kamery s tímto čipem pro mobilní telefony, videokamery a CCTV v denním režimu provozu.

Druhým posuzovaným čipem byl rovněž CCD od výrobce Kodak, konkrétně Kodak KAF-3200, nacházející využití převážně při snímání kamerami pro lékařské a vědecké účely. Z obrázku 7.3 je na první pohled zřejmé, že maximum spektrální citlivosti čipu je oproti konkurenci od Sony posunuto k delším vlnovým délkám, konkrétně se nachází v rozmezí  $\lambda = 565$ -635 nm. To má za následek výrazně vyšší přenos pohybující se v rozmezí 44,28 % až 46,91 %. Opět lze na základě přenosu rozhodnout o tom, že tento čip není zcela vhodný pro optimální snímání kamerami v oblasti IR, nicméně vhodnější, než předchozí čip od Sony z řady ICX.

Jako třetí, tedy poslední z čipů jsem vybral jeden z nejkvalitnějších pro snímání v oblasti IR, pracující na bázi CMOS. Jedná se o senzor Kodak z řady KAC, konkrétně KAC-9619, nacházející uplatnění především v zabezpečovací technice – noční vidění, strojové vidění, dále v automobilovém průmyslu a také pro čtečky čárových kódů. Tedy pro práci v černobílém režimu. Z obrázku 7.4 lze vidět maximum spektrální citlivosti čipu na hranici IR oblasti, konkrétně v rozmezí 750 – 800 nm. Přenos soustavy čipu a měřených IR LED se pohybuje v rozmezí 72,79 % až 78,01 %. Tento výsledek jasně dokazuje, že CMOS technologie je pro snímání v IR oblasti vhodnější, než čipy vyrobené na bázi CCD.

Následující tabulka stručně popisuje rozdíly, respektive výhody a nevýhody v čipech vyrobených technologií CCD a CMOS.

**Tab. 8.2:** Porovnání čipů CCD a CMOS. [32]

<b>Snímací čip</b>	<b>CCD</b>	<b>CMOS</b>
<b>Cena</b>	Vysoká	Nízká
<b>Spotřeba</b>	Vysoká	Nízká
<b>Kvalita obrazu</b>	Vysoká	Střední až nízká
<b>Rozlišení</b>	Vysoké	Střední
<b>Rychlost</b>	Střední až vysoká	Vysoká
<b>Rozměry řešení</b>	Vysoké	Nízké
<b>Činná plocha</b>	Vysoká	Nízká až střední
<b>Digitální šum</b>	Nízký	Vysoký

Jak je z tabulky patrné, CMOS čipy mají spoustu výhod, kterými jsou: nízká spotřeba, cena i rozměry řešení. Z hlediska energetické náročnosti, tedy nízké spotřebě, jsou ideální pro CCTV pracující ve 24h režimu snímání. Kvalita obrazu pro diagnostické účely a monitorování CCTV zde není tak kritickým parametrem, jako například u CCD pro fotografování, videozáznamy například z dovolené atd. Tímto se vysvětluje, proč se v digitálních fotoaparátech masivně používají CCD čipy a CMOS je spíše výjimkou. S příchodem BSI CMOS čipů lze ale očekávat masivní rozmach CMOS i v kompaktech digitálních fotoaparátů, takže CCD čipům do budoucna hrozí zánik. Jde o technologii upravující stávající způsob výroby fotocitlivých CMOS čipů. Technologie posouvá tranzistory a kovové obvody za fotocitlivou vrstvu. Mezi hlavní výhody BSI CMOS oproti dosavadním technologiím patří: vysoká citlivost čipu, rychlost, nižší spotřeba, malý rozměr, levnější a jednodušší výroba, než u CCD.

V podkapitole 7.4 jsem se věnoval modernímu pojetí CCTV pro interiérové využití, kdy je vlastní kamera s CMOS čipem implementována do „klasického“ LED svítidla. Na první pohled není patrné, že se jedná o důmyslný kamerový systém, spolupracující s přenosem dat pomocí Wi-Fi a ovládaný přes mobilní telefon uživatele, popřípadě počítač. Tímto příkladem jsem chtěl poukázat na možný vývoj CCTV do budoucna.

Tato práce byla pro mě přínosem z hlediska pochopení principu IR záření a v neposlední řadě jeho spolupráce s kamerovým systémem, kdy je pro jeho optimální snímání nutno zvolit čip s dostatečnou citlivostí. Ne vždy je vhodné posuzovat podle „jména“ výrobce, jak jsem se přesvědčil u výrobku pro diagnostické účely v IR oblasti značky Sony.

Veškeré přílohy, na které jsem se v práci odkazoval, jsou k dispozici na přiloženém datovém nosiči – CD.

## 9 Literatura

- [1] TAKÁCS, P. P.: Infračervené žiarenie v teórii a v praxi, 1. vydání, SVTL, 1957, Bratislava
- [2] LEVITIN, I. R.: Infračervená technika, 1. vydání, ALFA, 1973, Bratislava
- [3] VAŠKO, A.: Infračervené záření a jeho užití, 1. vydání, SNTL, 1963, Praha
- [4] Prezentace v PowerPointu zabývající se elektromagnetickým zářením [online]. 2016 [cit. 2016-10-21]. Dostupné z WWW:  
<<https://www.google.cz/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwiKk6aDirXQAhWKESwKHZ3kBx4QjxwIAw&url=http%3A%2F%2Fwww.zsezzlin.cz%2Fuserfiles%2Ffile%2Fheimova%2Ffyzika%2Felektromagnetickevllyazareni.pptx&psig=AFQjCNHOPV4jvMOt-fKCF9YTRCUVpx2vIQ&ust=1479653739556462>>
- [5] pro-therm.com, Výrobce IR zářičů a příslušenství [online]. 2016 [cit. 2016-10-21]. Dostupné z WWW: <[http://www.pro-therm.com/infrared\\_basics.php](http://www.pro-therm.com/infrared_basics.php)>
- [6] Webová prezentace o Williemu Herschelovi [online]. 2016 [cit. 2016-10-25]. Dostupné z WWW: <<https://www.emaze.com/@AFOFTRQL/STEM-extra-credit>>
- [7] Webová prezentace o zákonech elektromagnetického záření [online]. 2016 [cit. 2016-10-27]. Dostupné z WWW: <<http://slideplayer.cz/slide/2907028/>>
- [8] vutbr.cz, Wienův posouvací zákon [online]. 2016 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z WWW: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0203.htm>>
- [9] edmundoptics.com, Výrobce a dodavatel optických materiálů pro průmysl [online]. 2016 [cit. 2016-11-1]. Dostupné z WWW: <<http://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/the-correct-material-for-infrared-applications/>>
- [10] SOKANSKÝ, K., NOVÁK, T. a spol.: Světelná technika, 1. vydání, ČVUT, 2011, Praha
- [11] Norma ČSN ISO 80000-7, Veličiny a jednotky, část 7 – Světlo, 2012
- [12] provideyourown.com, webový článek zabývající se zářením LED a vlivu na člověka [online]. 2016 [cit. 2016-11-1]. Dostupné z WWW: <<http://provideyourown.com/2013/can-led-lighting-cause-blindess/>>
- [13] azooptic.com, web zabývající se poradenstvím pro výzkum a vědce v oblasti světla - optiky [online]. 2016 [cit. 2016-11-5]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=1090>>
- [14] elkovo-cepelik.cz, Výrobce světidel [online]. 2016 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.elkovo-cepelik.cz/led-svetelne-diody-light-emitting-diodes>>
- [15] smartview.cz, Dodavatel vyspělé techniky inteligentních senzorů, kamer, snímačů a osvětlení [online]. 2016 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.smartview.cz/osvetleni-strojoveho-videni>>
- [16] BOS, P.: Technická zpráva: Měření změn teplot chromatičnosti LED v závislosti na úhlu jejich vyzařování prostřednictvím spektrofotometrů, 2016
- [17] HRADÍLEK, Z., LÁZNIČKOVÁ, I., KRÁL, V.: Elektrotepelná technika, 1. vydání, ČVUT, 2011, Praha
- [18] Článek zabývající se slunečním zářením a jeho významem v životním prostředí [online]. 2016 [cit. 2016-12-3]. Dostupné z WWW:  
<[http://www.profesis.cz/files//dokumpdf/tp1.8.2/tp1.8.2\\_kap1.pdf](http://www.profesis.cz/files//dokumpdf/tp1.8.2/tp1.8.2_kap1.pdf)>

- [20] Článek zabývající se optickými vlákny [online]. 2017 [cit. 2017-20-2]. Dostupné z WWW: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%A9\\_vl%C3%A1kno](https://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%A9_vl%C3%A1kno)>
- [21] tydexoptics.com, Výrobce optických materiálů pro průmysl a všeobecné použití [online]. 2017 [cit. 2017-10-3]. Dostupné z WWW: <[http://www.tydexoptics.com/materials1/for\\_transmission\\_optics/](http://www.tydexoptics.com/materials1/for_transmission_optics/)>
- [22] jeti.com, Výrobce spektrometrů a dalších měřících zařízení včetně měřícího příslušenství [online]. 2017 [cit. 2017-10-3]. Dostupné z WWW: <<http://www.jeti.com/cms/index.php/instruments-55/radiometer/specbos/specbos-1211>>
- [23] Spektrální rozsah citlivost lidského oka a snímáče (čip) s různými, barevnými zářiči; poskytnuto jako příloha .png e-mailem.
- [24] blog.astrofotky.cz, Článek zabývající se CCD senzory [online]. 2017 [cit. 2017-15-3]. Dostupné z WWW: <<http://blog.astrofotky.cz/pavelpech/?p=864>>
- [25] icpdas.com, Článek zabývající se rozdílem v čípech CCD a CMOS [online]. 2017 [cit. 2017-17-3]. Dostupné z WWW: <[http://www.icpdas.com/products/Vision/mavis/vision\\_glossary\\_n~z.htm](http://www.icpdas.com/products/Vision/mavis/vision_glossary_n~z.htm)>
- [26] Prezentace zabývající se CCTV [online]. 2017 [cit. 2017-15-3]. Dostupné z WWW: <<https://www.bicsi.org/pdf/presentations/northeast10/Understanding%20Megapixel%20Camera%20Technology.pdf>>
- [27] Schematické znázornění měření zářičů. poskytnuto jako příloha .png e-mailem.
- [28] eazzydv.com, Výrobce zabezpečovacích zařízení pro domácnost. [online]. 2017 [cit. 2017-25-3]. Dostupné z WWW: <<http://www.eazzydv.com/c6801.html>>
- [29] Norma ČSN 36 0013, Zdroje světla. Metody měření elektrických a světelných parametrů, Neplatná norma - není nahrazena.
- [30] Norma ČSN EN 62471, Fotobiologická bezpečnost světelných zdrojů a soustav světelných zdrojů, 2009
- [31] Norma ČSN EN 60598 – 1 ed. 5, Svítidla - Část 1: Všeobecné požadavky a zkoušky, 2009
- [32] digimanie.cz, Článek zabývající se čipy CCD a CMOS [online]. 2017 [cit. 2017-28-3]. Dostupné z WWW: <<http://www.digimanie.cz/fotomobily-snimaci-cipy-cmos-vs-ccd/2885>>
- [33] EST, Měření křivek svítivosti, Návod do pro laboratorní měření z předmětu EST [online]. 2017 [cit. 2017-29-3]. Dostupné z WWW: <[http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/f\\_studium.htm](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/f_studium.htm)>